

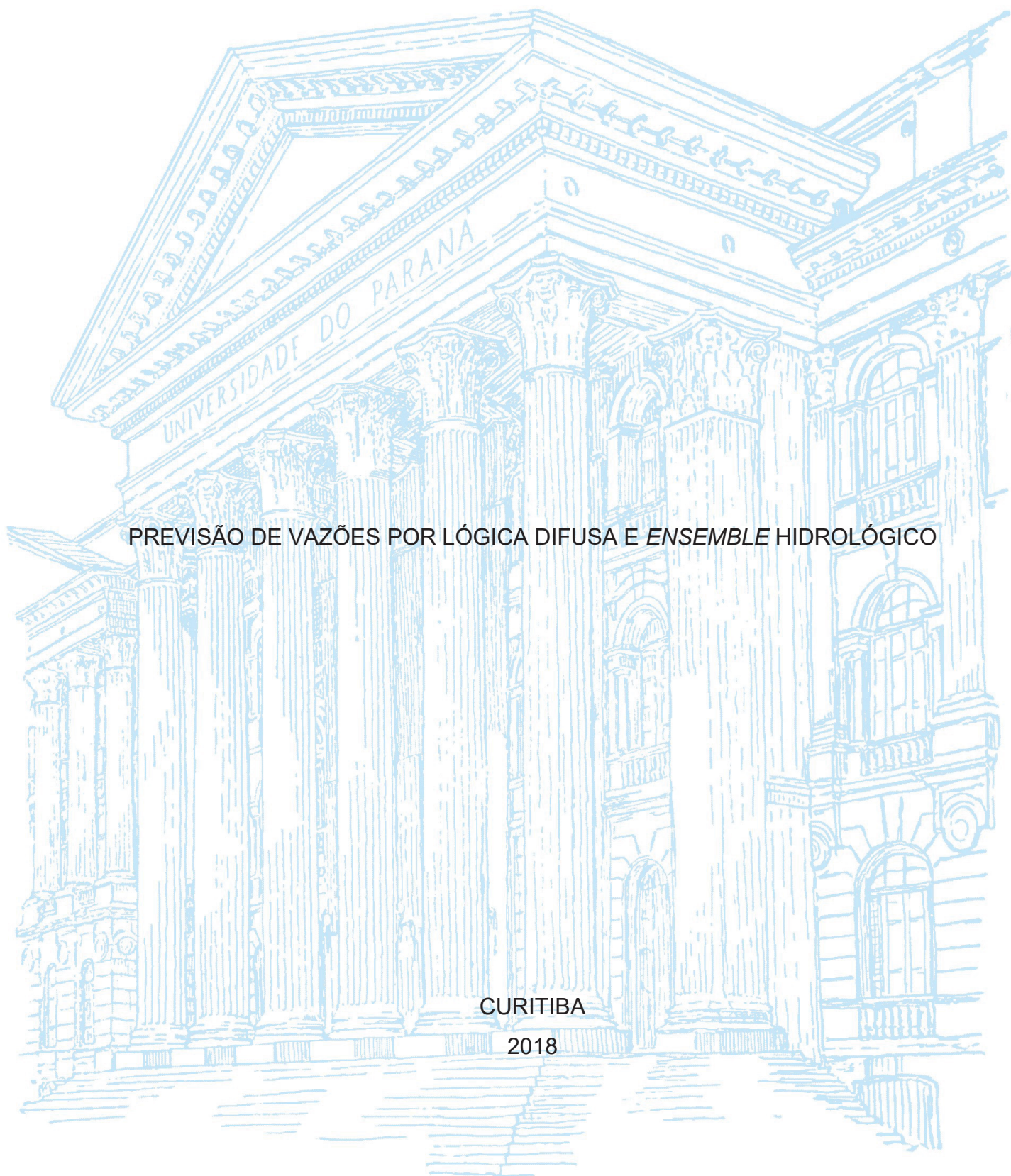
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RUBEM LUIZ DARU

PREVISÃO DE VAZÕES POR LÓGICA DIFUSA E *ENSEMBLE* HIDROLÓGICO

CURITIBA

2018



RUBEM LUIZ DARU

PREVISÃO DE VAZÕES POR LÓGICA DIFUSA E *ENSEMBLE* HIDROLÓGICO

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, no programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, setor Tecnologia, área de concentração de Engenharia de Recursos Hídricos, Setor de exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues Bessa
Coorientador: Prof. Dr. Eloy Kaviski

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

D227p Daru, Rubem Luiz
 Previsão de vazões por lógica difusa e ensemble hidrológico / Rubem Luiz Daru. – Curitiba,
 2018.
 224 p. : il. color.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2018.

Orientador: Marcelo Rodrigues Bessa.
Coorientador: Eloy Kaviski.

1. Previsão de vazão. 2. Lógica fuzzy. 3. Ensemble pluviométrico. I. Universidade Federal
do Paraná. II. Bessa, Marcelo Rodrigues. III. Kaviski, Eloy. IV. Título.

CDD: 551.48

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL

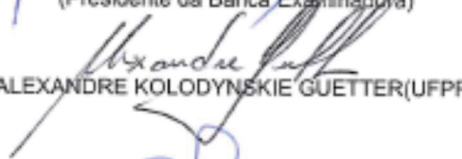
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **RUBEM LUIZ DARU**, intitulada: **PREVISÃO DE VAZÕES POR LÓGICA DIFUSA E ENSEMBLE HIDROLÓGICO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de Doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 11 de Abril de 2018.


MARCELO RODRIGUES BESSA(UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)


ALEXANDRE KOLODYNISKIE GUETTER(UFPR)


MIRIAM RITA MORO MINE(UFPR)


VOLMIR EUGÊNIO WILHELM(UFPR)


EDUARDO ENÉAS DE FIGUEIREDO(UFCG)


ELOY KAVISKI(UFPR)

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a UFPR (Universidade Federal do Paraná, Brasil) através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) pela oportunidade do desenvolvimento desta tese de doutorado. O LACTEC (Instituto de tecnologia para o Desenvolvimento) pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa, a CEMIG pelo programa de P&D correlato e pela utilização do sistema Few-Deltares desenvolvido por LACTEC e DELTARES (2016).

Ao meu orientador, prof. Marcelo Rodrigues Bessa e ao co-orientador prof. Eloy Kaviski pela orientação neste trabalho que foram de grande valia para um melhor resultado final.

Aos professores da banca, Alexandre Kolodynskie Guetter, Miriam Rita Moro Mine, Volmir Eugênio Wilhelm e Eduardo Eneas de Figueiredo pelos ensinamentos transmitidos.

Aos colegas do LACTEC envolvidos no projeto de Pesquisa “Implementação de sistema de acoplamento de modelos e informação telemétrica visando à otimização da operação de reservatórios em tempo real, com foco no controle de cheias”, em especial ao João Paulo Jankowski Saboia pelos ensinamentos da linguagem de programação Python.

“O que prevemos raramente ocorre;
o que menos esperamos geralmente
acontece.”

(Benjamin Disraeli)

RESUMO

O conceito de lógica e variável difusa geralmente é utilizado na representação das incertezas de um modelo. O método sugerido nesta tese utiliza previsão pluviométrica por *ensemble* e o conceito de lógica difusa como objetivo de obter um hidrograma previsto que seja melhor que o hidrograma médio de um *ensemble* hidrológico. Para isso as precipitações previstas do *ensemble* são *fuzificadas* através de funções de pertinência. Através das precipitações previstas *fuzificadas*, do grau de pertinência da precipitação observada e de regras difusas se obtém as precipitações previstas pelo método proposto que se transforma em vazões previstas através da modelagem chuva-vazão pelo modelo Sacramento. Para avaliar o método proposto, o hidrograma previsto é então comparado com as vazões observadas. As vazões obtidas pela média do *ensemble* também são comparadas com as vazões observadas. Os resultados mostram que apesar do método sugerir uma leve melhora em alguns casos na etapa de calibração, na vazão prevista final o método proposto não teve êxito, sendo equivalente a utilizar a vazão média do *ensemble* hidrológico.

Palavra Chave: Previsão de vazão. Lógica *fuzzy*. *Ensemble* pluviométrico.

ABSTRACT

The concept of logic and diffuse variable is usually used in the uncertainties of a model. The method suggested in this thesis uses pluviometric forecast by ensemble and the concept of diffuse logic as objective to obtain a predicted hydrograph that is better than the average hydrograph of hydrological ensemble. For this, the expected precipitations of the ensemble are fuzzified through pertinence functions. By means of the fuzzified predicted precipitations, the pertinence degree of the observed precipitation and of diffuse rules, the precipitations are obtained, foreseen by the proposed method, which becomes the expected flows through the rainfall-flow modeling by the Sacramento model. To evaluate the proposed method, the predicted hydrograph is then compared with the observed flow rates. The flows obtained by the average ensemble are also compared with the observed flows. The results show that although the method suggests a slight improvement in some cases in the calibration stage, in the expected final flow the proposed method was not successful, being equivalent to using the average flow of the hydrological ensemble.

Key-words: Forecast of flow. Fuzzy logic. pluviometric ensemble.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de termos linguísticos e funções de pertinência	32
Figura 2 - Inferência difusa pelo método de Mamdani. Fonte: Hamed, B (2016)..	33
Figura 3 - Agregação pelo método de Mamdani. Fonte: Hamed, B (2016).....	34
Figura 4 - Inferência difusa pelo método de Sugeno. Fonte: Hamed, B (2016)	34
Figura 5 - Esquematização de funcionamento do modelo hidrológico Sacramento Fonte: adaptado de CRC (2004).....	43
Figura 6 – Comparação das performances de previsões determinísticas e por <i>ensemble</i> para duas previsões (a) e (b).....	54
Figura 7 - Vazões e seus Termos Linguísticos	57
Figura 8 – As três primeiras regras difusas e a inferência utilizando o método de Sugeno.....	60
Figura 9 - Hidrogramas nos vários instantes após a previsão pluviométrica.....	62
Figura 10 – Esquema do método proposto	63
Figura 11 - Esquema de calibração para obtenção dos parâmetros L , a , b	65
Figura 12 – MDE ASTER - Bacia do rio Itabapoana	76
Figura 13 – MDE ASTER - Bacia do rio Jequitinhonha.....	77
Figura 14 – Classificação climatológica de Köppen – Bacia do Rio Itabapoana ...	79
Figura 15 - Classificação Climatológica de Köppen - Bacia do Rio Jequitinhonha	79
Figura 16 - Mapa da distribuição da vegetação/uso do solo na bacia do Rio Itabapoana.....	81
Figura 17 - Mapa da distribuição da vegetação/uso do solo na bacia do Rio Jequitinhonha.....	82
Figura 18 – Estações climáticas consideradas na obtenção da evapotranspiração (Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014).....	89
Figura 19 – Estações pluviométricas e fluviométricas principais - Bacia do rio Itabapoana	92
Figura 20 – Discretização da área estudada em microbacias - Bacia do rio Itabapoana	93
Figura 21 – Discretização em sub-bacias conforme configuração considerada na calibração - Bacia do rio Itabapoana.....	94
Figura 22 – Hidrogramas observados e simulados em Caiana no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior).....	97

Figura 23 – Hidrogramas observados e simulados em Dores do Rio Preto no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)	98
Figura 24 – Hidrogramas observados e simulados em Guaçuí no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior).....	99
Figura 25 – Hidrogramas observados e simulados em São José do Calçado no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)	100
Figura 26 – Estações pluviométricas e fluviométricas principais - Bacia do rio Jequitinhonha.....	103
Figura 27 – Discretização da área estudada em microbacias - Bacia do rio Jequitinhonha.....	104
Figura 28 – Discretização em sub-bacias conforme configuração considerada na calibração - Bacia do rio Jequitinhonha.	107
Figura 29 – Hidrogramas observados e simulados em V.T. Branca Jusante no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)	109
Figura 30 – Hidrogramas observados e simulados em Grão Mogol no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior).....	110
Figura 31 – Hidrogramas observados e simulados em Rubelita no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior).....	111
Figura 32 – Hidrogramas observados e simulados em Ponte Vacaria no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior).....	112
Figura 33 – Vazão observada afluente à UHE Rosal	114
Figura 34 – Vazão observada afluente à UHE Irapé.....	114
Figura 35 - Gráfico da precipitação em função do tempo de duração da chuva para $T_r = 100$ anos. Obtida da equação de chuvas intensas	117
Figura 36 – Comparação entre os índices de NS do método proposto com fuzificação nas vazões (pertinência exponencial) e da média do <i>ensemble</i> hidrológico (CPTEC), para vazões na bacia do Itabapoana	120
Figura 37 – Comparação entre os índices de NS do método proposto com fuzificação nas vazões (pertinência Gaussiana) e da média do <i>ensemble</i> hidrológico (CPTEC), para vazões na bacia do Itabapoana	121
Figura 38 – Comparação entre os índices de NS do método proposto com fuzificação nas vazões (pertinência triangular) e da média do <i>ensemble</i> hidrológico (CPTEC), para vazões na bacia do Itabapoana	122

Figura 39 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando as Chuvas diárias (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (ECMWF) para a bacia do Itabapoana.....	126
Figura 40 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando chuva diária (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (CPTEC) para a bacia do Itabapoana	127
Figura 41 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (GEFS) para chuva diária e bacia do Itabapoana.....	128
Figura 42 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando a chuva diária (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (CPTEC), para a bacia do Jequitinhonha.....	129
Figura 43 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando a chuva diária (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (GEFS), para a bacia do Jequitinhonha	130
Figura 44 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (ECMWF), chuva diária e bacia do Jequitinhonha	131
Figura 45 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando chuvas de 6 horas (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (CPTEC): Bacia do Itabapoana.....	135
Figura 46 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando chuvas de 6 horas (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (GEFS): Bacia do Itabapoana	136
Figura 47 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (ECMWF). Bacia do Itabapoana, chuva acumulada de 6 horas	137
Figura 48 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (CPTEC): Bacia do Jequitinhonha.....	138
Figura 49 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (GEFS): Bacia do Jequitinhonha.....	139

Figura 50 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (ECMWF): Bacia do Jequitinhonha, chuva acumulada de 6 horas.....	140
Figura 51 – Previsão pluviométrica por <i>ensemble</i> (CPTEC) em 04 de novembro de 2011 à meia-noite (média do ensemble em linha azul) e previsão pluviométrica pelo método proposto em 05 novembro de 2011 à meia-noite (em traços vermelhos) utilizando estações pluviométricas convencionais. Chuva acumulada diária: Bacia do Itabapoana.....	145
Figura 52 – Previsão pluviométrica por <i>ensemble</i> (ECMWF) em 13 de novembro de 2011 à meia-noite e previsão pluviométrica pelo método proposto em 14 de novembro de 2011 à meia noite utilizando estações pluviométricas convencionais (linha vermelha). Chuva acumulada diária: Bacia do Itabapoana.	145
Figura 53 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (ECMWF): Bacia do Itabapoana.	146
Figura 54 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (GEFS): Bacia do Itabapoana.	147
Figura 55 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuva diária e pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (CPTEC): Bacia do Itabapoana.....	148
Figura 56 – Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão da precipitação pluviométrica por <i>ensemble ECMWF</i>): Bacia do Itabapoana.	149
Figura 57- Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão da precipitação pluviométrica por <i>ensemble GEFS</i>): Bacia do Itabapoana.	149
Figura 58 - Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão da precipitação pluviométrica por <i>ensemble CPTEC</i>): Bacia do Itabapoana.....	150
Figura 59 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (ECMWF): Bacia do Jequitinhonha.	151

Figura 60 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (GEFS): Bacia do Jequitinhonha.....	152
Figura 61 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuva diária e pertinência exponencial) e da média dos <i>ensembles</i> pluviométricos (CPTEC): Bacia do Jequitinhonha.	153
Figura 62 – Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão pluviométrica por <i>ensemble ECMWF</i>): Bacia do Jequitinhonha.....	154
Figura 63- Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão pluviométrica por <i>ensemble GEFS</i>): Bacia do Jequitinhonha.....	154
Figura 64 - Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão pluviométrica por <i>ensemble CPTEC</i>): Bacia do Jequitinhonha.....	155
Figura 65 – Previsão pluviométrica por <i>ensemble</i> (ECMWF) em 10 de outubro de 2011 às 9 horas e previsão pluviométrica pelo método proposto em 10 de outubro de 2011 às 21 horas utilizando observação do dia 10/10/2011 as 21 horas de estações telemétricas (linha vermelha): Bacia do Itabapoana, chuva acumulada 6 horas.	156
Figura 66 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas cada 6 horas e pertinência exponencial) e da média do <i>ensemble</i> pluviométrico (ECMWF): Bacia do Itabapoana.	157
Figura 67 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas cada 6 horas e pertinência exponencial) e da média do <i>ensemble</i> pluviométrico (GEFS): Bacia do Itabapoana.....	158
Figura 68 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuva cada 6 horas e pertinência exponencial) e da média do <i>ensemble</i> pluviométrico (CPTEC): Bacia do Itabapoana.....	159
Figura 69 – Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método fuzzificando chuvas e 6 horas (eixo x: dias após a previsão pluviométrica por <i>ensemble ECMWF</i>).....	160

Figura 70- Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método fuzzificando chuvosa de 6 horas (eixo x: dias após a previsão pluviométrica por <i>ensemble GEFS</i>).	160
Figura 71 - Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método fuzzificando chuvas de 6 horas (eixo x: dias após a previsão pluviométrica por <i>ensemble CPTEC</i>).	161
Figura 72 - Comparação entre os índices de NS do método proposto e da média do <i>ensemble</i> hidrológico (pluv: CPTEC) para a bacia do Itabapoana.	162
Figura 73 – Índices de NS em função das datas de previsões. Itabapoana e <i>ensemble CPTEC</i>	163
Figura 74 – Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia de Itabapoana e <i>ensemble CPTEC</i>	163
Figura 75 - Comparação entre os índices de NS do método proposto e da média do <i>ensemble</i> hidrológico (pluv: GEFS) para a bacia do Itabapoana.	164
Figura 76 - Índices de NS em função das datas de previsões. Itabapoana e <i>ensemble GEFS</i>	164
Figura 77 - Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia de Itabapoana, <i>ensemble GEFS</i>	165
Figura 78 - Comparação entre os índices de Nash-Sutcliffe (NS) do método proposto e da média do <i>ensemble</i> hidrológico (pluv: CPTEC) para a bacia do Jequitinhonha.	167
Figura 79 - Índices de NS em função das datas de previsões. Jequitinhonha e <i>ensemble CPTEC</i>	167
Figura 80 - Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia Jequitinhonha, <i>ensemble CPTEC</i>	168
Figura 81 - Comparação entre os índices de Nash-Sutcliffe (NS) do método proposto e da média do <i>ensemble</i> hidrológico (pluv: GEFS) para a bacia do Jequitinhonha.	168
Figura 82 - Índices de NS em função das datas de previsões. Jequitinhonha e <i>ensemble GEFS</i>	169
Figura 83 - Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia Jequitinhonha, <i>ensemble GEFS</i>	169
Figura 84 – Previsão de vazões em 24/12/2011 as 12:00.	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do modelo chuva-vazão Sacramento.....	44
Tabela 2 - Fórmulas para estimativa do tempo de concentração (horas) de uma bacia hidrográfica.....	74
Tabela 3 – Tempo de Concentração em horas	75
Tabela 4 – Estações climáticas consideradas na obtenção da evapotranspiração	87
Tabela 5 – Estações pluviométricas principais - Bacia do rio Itabapoana.....	90
Tabela 6 – Estações fluviométricas principais - Bacia do rio Itabapoana.....	90
Tabela 7 – Períodos de aquecimento, calibração e validação do modelo - Bacia do rio Itabapoana	91
Tabela 8 – Valores estimados dos parâmetros - Bacia do rio Itabapoana	95
Tabela 9 – Performance do modelo hidrológico - Bacia do rio Itabapoana	96
Tabela 10 – Estações fluviométricas principais - Bacia do rio Jequitinhonha	101
Tabela 11 – Estações pluviométricas principais - Bacia do rio Jequitinhonha	102
Tabela 12 – Períodos de aquecimento, calibração e validação - Bacia do rio Jequitinhonha.....	105
Tabela 13 – Valores estimados dos parâmetros - Bacia do rio Jequitinhonha....	106
Tabela 14 – Performance do modelo hidrológico - Bacia do rio Jequitinhonha...	108
Tabela 15 - Parâmetros para as equações de chuva intensa	116
Tabela 16 – Resultados da calibração dos parâmetros. Comparação do método proposto com a média do <i>ensemble</i> do CPTEC, mostrando os coeficientes de Nash-Sutcliffe.....	119
Tabela 17 – Desempenho comparativo (pelo NS) entre o método proposto e a média dos <i>ensembles</i> (precipitação acumulada diária) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Itabapoana	124
Tabela 18 - Desempenho comparativo (pelo NS) entre o método proposto e a média dos <i>ensembles</i> (precipitação acumulada diária) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Jequitinhonha	125
Tabela 19 – Desempenho comparativo entre o método proposto e a média do <i>ensemble</i> (precipitação acumulada de 6 horas) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Itabapoana.....	133

Tabela 20 – Desempenho comparativo entre o método proposto e a média do <i>ensemble</i> (precipitação acumulada de 6 horas) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Jequitinhonha	134
Tabela 21 – Parâmetros médios de cada grupo utilizando o CPTEC e bacia do Jequitinhonha.....	141
Tabela 22 - Estatística comparativa do Nash-Sutcliffe, Itabapoana	162
Tabela 23 - Estatística comparativa do Nash-Sutcliffe, Jequitinhonha.....	166
Tabela 24 – Resultado do método na Calibração (fuzificação da chuva)	170
Tabela 25 - Resultado do método na previsão de chuva acumulada.....	170
Tabela 26 - Resultado do método na previsão de vazão	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP – Análise de Componentes Principais

ANA – Agência Nacional das Águas.

ARIMA- Modelo autoregressivo integrado de média móvel..

ARMA - Modelo autoregressivo de média móvel.

BSS – *Brier Skill Score*

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

CMORPH - *Climate Prediction Center Morphing Algorithm*

COPEL – Companhia Paranaense de Energia.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CRPS – *Continuous Ranked Probability Score*

DELTARES – Instituto de tecnologia localizado na Holanda.

DD – Diagrama de Dispersão

ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EVT - Evapotranspiração

FAR – Taxa de Alarme falso

FSDP - Programação dinâmica estocástica de estado difuso.

GEFS – *Global Ensemble Forecast System*

HBV- *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* – Modelo hidrológico.

HYDROTEL – Modelo hidrológico Hydrotel

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPHII – Modelo hidrológico desenvolvido pelo IPH da UFRGS.

LARSIM – *Large Area Runoff Simulation Model* - Modelo de previsão de vazão em tempo real.

MGB –IPH – Modelo hidrológico de Grandes Bacias desenvolvido pelo IPH (Instituto de pesquisa hidráulica da UFRGS)

MPC - *Model Predictive Control*

NCEP – *National Centers for Environmental Prediction.*

NS – coeficiente de Nash-Sutcliffe

NWP- *Numerical Weather Prediction*

NWS – *Nacional Weather Service*

POD – Probabilidade de detecção

PODF – Probabilidade de Falsa Detecção

ROC – *Relative Operating Characteristic*

RRL – *Rainfall Runoff Library*

SAC-SMA – Modelo chuva – vazão Sacramento.

SBD – *Spread-Bias Diagram*

SDP – Programação dinâmica estocástica (*Stochastic Dynamic Programming*)

SOBEK- modelo hidrodinâmico desenvolvido pela Deltares

TFM- Modelo de Função de Transferência.

TIGGE – *Thorpex Interactive Grand Global Ensemble*

TRMM-TMPA – *Multi-satellite Precipitation Analysis*

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Risco associado

k - Número de anos utilizados

n - Número de anos

$P(t)$ - Potência gerada no tempo t

PI - Potência instalada

t - *Tempo*

$q(t)$ - Vazão defluente

$h(t)$ - Queda bruta líquida média

g - Gravidade

δ - Coeficiente englobando rendimento, fator de planta, densidade da água e transformação de unidades.

h - Taxa de acerto

CP - Coeficiente de Persistência

r - Coeficiente de correlação

EM - Erro Médio

EMQ - Erro médio Quadrático

CRPS - *Continuous Ranked Probability Score*

MAE - *Mean absolute error*

p - Probabilidade de ocorrer o hidrograma previsto i

μ_i - Função de pertinência ao i -ésimo hidrograma do *ensemble*.

V_{obs} - Vazão observada no tempo $t+1$.

V_{pi} - Vazão prevista no tempo $t+1$ para o i -ésimo hidrograma do *ensemble*.

Q - Vazão observada afluente ao reservatório

\bar{Q} - Vazão observada média

\hat{Q} - Vazões previstas pelo método $VF_{pT^{j+1}}$ para os tempos $t+1$ até h ($j=1$ a $h=t$)

$\hat{\bar{Q}}$ - Vazão prevista média.

P_{obs} - Precipitação acumulada observada.

$P_{pi^{t+j}}$ - Precipitação acumulada prevista pelo membro i para o tempo $t+j$.

NS - Coeficiente de *Nash-sutcliffe*.

Kc - Coeficiente de compacidade.

L - Comprimento do talveg principal (km)

i - Declividade (%)

i' - Declividade m/km

i'' - Declividade m/m

H - Diferença de cota entre as extremidades da linha de água principal (m)

A - Área de drenagem da bacia hidrográfica (km²)

H_1 - Altura média da bacia (m) acima da cota na exutória;

T_c - Tempo de concentração em horas;

BIAS - Tendenciosidade

RMSE - Erro padrão médio

m - Índice térmico anual ou índice de calor anual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS	24
1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 VISÃO GERAL	26
2.2 LÓGICA DIFUSA.....	30
2.2.1 A Teoria da Lógica Difusa.....	30
2.2.2 Modelos de Tomada de Decisão através de Lógica Difusa	35
2.2.3 Otimização e Lógica Difusa	36
2.2.4 Modelos Hidrológicos e Lógica Difusa	38
2.3 PREVISÕES DE VAZÕES	39
2.3.1 Modelo Sacramento chuva-vazão.....	42
2.3.2 Precipitações nas previsões de vazões	44
2.3.3 Previsões de vazões por <i>ensemble</i>	48
2.4 ATUALIZAÇÃO DE ESTADO INICIAL DA PREVISÃO DE VAZÃO	54
3 MÉTODO PROPOSTO	56
3.1 FUZIFICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS PREVISTOS	56
3.2 INFERÊNCIA DIFUSA E OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA FINAL	59
3.3 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS VAZÕES.....	64
3.4 FUZIFICAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES ACUMULADAS PREVISTAS	66
3.5 INFERÊNCIA DIFUSA E OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA FINAL NO CASO DE FUZIFICAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES	66
3.6 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES	67
3.7 CLASSIFICAÇÃO DE <i>ENSEMBLES</i> UTILIZANDO ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	68
3.8 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	70
4 ESTUDO DE CASO	73
4.1 HIDROGRAFIA DAS BACIAS	73
4.2 RELEVO.....	75
4.3 CLIMA	78

4.4 VEGETAÇÃO E OCUPAÇÃO DO SOLO	80
5 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO AO ESTUDO DE CASO	83
5.1 PREVISÃO PLUVIOMÉTRICA.....	83
5.2 MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO	84
5.2.1 Calibração dos parâmetros da bacia do rio Itabapoana.....	88
5.2.2 Calibração dos parâmetros da bacia do rio Jequitinhonha	101
5.2.3 Obtenção do <i>ensemble</i> de vazões previstas	113
5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	113
5.3.1 Período escolhido e obtenção dos dados de vazões observadas	113
5.3.2 Calibração dos parâmetros do método	115
5.3.3 Ajuste da precipitação observação ao intervalo de tempo	116
6 RESULTADOS	118
6.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS COM FUZZIFICAÇÃO DAS VAZÕES.....	118
6.2 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS COM FUZZIFICAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES	123
6.2.1 Precipitações acumuladas diárias.....	123
6.2.2 Precipitações acumuladas a cada 6 horas.....	132
6.2.3 Resultados da classificação dos <i>ensembles</i> por Análise dos componentes principais.....	141
6.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO <i>ONLINE</i> DO MÉTODO	142
6.3.1 Resultado nas precipitações com a utilização de chuvas acumuladas diárias	144
6.3.2 Resultado nas precipitações com a utilização de chuvas acumuladas cada 6 horas em Itabapoana	155
6.3.3 Resultado nas vazões com a utilização de chuvas acumuladas diárias	161
6.4 RESUMO DOS RESULTADOS	170
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	172
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
APÊNDICE A.....	183

1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios têm, normalmente, como principais funções a geração de energia e/ou abastecimento de água para consumo humano e industrial. Eles também podem ser utilizados para outras finalidades como abastecimento de água para irrigação, atividades recreativas e controle de cheias. Os reservatórios com volume útil podem ajudar a mitigar os efeitos de uma cheia no vale a jusante, desde que possuam boas regras operativas para tal e tenham uma boa previsão de vazões. Mesmo os reservatórios sem volume útil (os chamados de operação a fio d'água), na prática, também podem abater o pico da cheia (em menor magnitude).

O conflito de interesses entre geração de energia, abastecimento de água, controle de cheias, atividades recreativas e outras, gera a necessidade da criação de ferramentas matemáticas (modelos matemáticos) para uso otimizado deste recurso tão importante que é a água, para que melhor atenda a sociedade como um todo. Este conflito tem se intensificado recentemente em eventos como, por exemplo, a seca prolongada de 2014 e 2015 na região sudeste do Brasil, provocando a necessidade de obra de transposição de água do rio Paraíba do Sul para abastecimento de água da cidade de São Paulo e conseqüentemente diminuir a vazão para geração de energia nas cidades do Rio de Janeiro (Globo, 2015). Com isso foi preciso reduzir a geração de energia em toda a cascata do rio Paraíba do Sul.

Geralmente os reservatórios ajudam a amenizar as inundações retendo parte do volume de água para liberá-la mais tarde, desde que o reservatório tenha boas regras operativas. Para a geração de energia, o reservatório deve permanecer na maior parte do tempo em sua cota máxima possível (atendendo o despacho) para proporcionar uma carga d'água máxima e, portanto, energia máxima. Para a proteção do vale do rio a jusante, o nível do reservatório deve estar rebaixado para poder capturar o volume de uma possível cheia que possa ocorrer no futuro. Este conflito de interesse é resolvido pelos modelos matemáticos de otimização. Eventos de cheias não são corriqueiros para a percepção da população que acaba construindo casas nas margens dos rios onde ocorrerá a inundação. Além disso, muitas vezes as prefeituras aprovam loteamentos nestas regiões sujeitas a inundações. Mesmo em caso de reservatórios que funcionam com operação a fio

d'água, onde o regime de escoamento das águas pelo rio mantém-se inalterado, as atividades de geração de energia por parte das concessionárias são associadas pela população aos danos de uma enchente tornando-se, logo, imputáveis legalmente pelos mesmos. Como exemplos se tem: a cheia ocorrida no rio Iguaçu à jusante da UHE Salto Caxias no início de junho de 2014 atingindo várias propriedades e casas rurais (Gazeta do Povo, 2015), em que a população atribuiu que a cheia foi consequência da operação do reservatório; a cheia ocorrida no rio Araguari em Ferreira Gomes, em 2015 (Globo, 2015a), em que a proprietária da barragem Cachoeira Caldeirão (em construção), cuja ensecadeira rompeu, atribuiu à operação das barragens à jusante (UHE's de Coaracy Nunes e Ferreira Gomes) ao agravamento das enchentes na cidade. Fatos como estes obrigam as concessionárias de energia a refinarem os métodos de operação de forma a também mitigar enchentes e se defender de possíveis imputações de responsabilidades por parte da população ou de outras barragens ou órgão.

Para a boa gerência e operação dos reservatórios no período chuvoso é de grande importância um bom sistema de previsão de vazões. Um bom sistema de previsão deve obter o menor erro possível nas previsões e gerar um mapa de risco, apresentando probabilidades das vazões excederem um limite, para auxiliar na tomada de decisão.

Portanto é de suma importância a melhoria dos modelos de otimização e previsão de vazões para que os reservatórios operem de forma a minimizar os riscos de enchentes, evitando danos físicos às pessoas e resultando em menores prejuízos econômicos tanto para a população quanto para a concessionária de energia.

Existem inúmeras incertezas envolvidas na modelagem da previsão de vazões. Estas incertezas são relativas aos dados de entrada dos modelos que podem ser: precipitações previstas, precipitações observadas, vazões observadas, parâmetros hidrológicos como por exemplo, vazão subterrânea, coeficiente de infiltração, entre outros. Além destas incertezas tem-se as incertezas relativas as estruturas dos modelos hidrológicos e meteorológicos.

Estas inúmeras incertezas geram valores de previsão que originam erros já no instante inicial. Modelos de atualização de estado do sistema são utilizados para corrigir parcialmente estes erros. Entre eles destaca-se o filtro de Kalman, os modelos autoregressivos (AR, ARMA e ARIMA), redes neurais e lógica difusa.

Uma das maiores incertezas são as previsões de precipitações. O método usual para obter indicativos desta incerteza é a utilização da previsão pluviométrica por *ensemble*. Entretanto a ciência está longe de um modelo de previsão de vazões que tenha um acerto de bom a ótimo. Portanto a pesquisa de novos métodos para a melhoria da previsão é bem-vinda.

Esta tese apresenta uma abordagem semelhante a uma atualização de estado, na medida em que se utiliza observação de precipitações nos instantes iniciais após a previsão para melhorar esta previsão. Será utilizada, para isto, a lógica difusa e *ensemble* pluviométrico em uma abordagem ainda não observada na literatura.

1.1 OBJETIVOS

A proposta desta tese é tentar uma melhoria na previsão de vazões através de técnicas da lógica difusa. Para isso as vazões e as precipitações foram consideradas as variáveis difusas, foi utilizada a previsão pluviométrica por *ensemble* (conjunto de previsões), a lógica difusa e o modelo hidrológico chuva-vazão Sacramento. O modelo Sacramento foi escolhido por ser amplamente conhecido e utilizado o que facilita a calibração diminuindo assim os possíveis erros provenientes.

Destaca-se que a principal contribuição inovadora desta tese se refere às adaptações realizadas através de lógica difusa no conjunto de hidrogramas previstos e/ou no conjunto de previsões pluviométricas, com o intuito de obter um hidrograma previsto afluente ao reservatório que na hipótese a ser testada seja melhor que a média dos hidrogramas previstos pelo *ensemble* pluviométrico.

Portanto o objetivo final é obter um método de previsão de vazão que tenha um desempenho melhor que a média das previsões hidrológicas por *ensemble*. Em outras palavras a hipótese a ser testada nesta tese é que a previsão obtida pelo método proposto seja melhor que a média dos *ensembles*.

A ideia do modelo proposto é de certa forma minimizar a incerteza com a utilização da observação da precipitação nos primeiros momentos após a previsão pluviométrica. Com esta observação e as previsões pluviométricas por *ensemble* e utilizando métodos da lógica difusa obter uma previsão pluviométrica única e

consequentemente uma previsão de vazões utilizando um modelo chuva-vazão. A sequência dos métodos e a maneira como eles foram utilizados são inéditos.

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- 1) Elaboração da revisão bibliográfica a respeito de previsões de vazões e lógica difusa aplicada neste tema e temas correlatos.
- 2) Realizar a modelagem hidrológica chuva-vazão em duas bacias hidrográficas hidrologicamente diferentes.
- 3) Adaptar a ferramenta computacional FEWS da Deltares para agregar os componentes de uma modelagem da previsão pluviométrica até a previsão de vazões.
- 4) Desenvolver um método para utilizar a lógica difusa e *ensemble* pluviométrico de maneira inédita.
- 5) Aplicar o método proposto.
- 6) Realizar o agrupamento das várias calibrações realizadas.
- 7) Testar o método proposto para duas bacias hidrográficas e três diferentes previsões por *ensemble* pluviométrico.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Inicialmente, no capítulo 2, são descritos os vários modelos e métodos aplicados em todas as etapas do estudo: lógica difusa, previsões de precipitações, estimativa das precipitações, previsão de vazões e modelos hidrológicos.

No capítulo 3 é apresentado o método proposto para atingir os objetivos onde é descrita a utilização da lógica difusa no contexto do estudo de caso.

Nos capítulos 4 e 5 é apresentado o estudo de caso.

No capítulo 6 são apresentados os resultados e no capítulo 7 as conclusões e recomendações.

No Apêndice A encontra-se mais resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo descrevem-se conceitos, modelos e métodos importantes empregados na modelagem de vazões para um sistema de alerta a cheias a jusante de uma barragem, através de uma revisão bibliográfica. Isto inclui precipitações, modelos hidrológicos para previsão de vazões, operação de reservatórios e modelos hidrodinâmicos e lógica difusa relacionada ao tema.

2.1 VISÃO GERAL

Para o amortecimento de cheias a primeira ideia que surge é a manutenção do reservatório numa cota inferior à máxima normal para que este absorva o volume de água da cheia e o libere de maneira gradual após o final da onda da cheia, de modo que a vazão máxima a jusante não exceda um valor pré-determinado (vazão de restrição). Este volume do reservatório que permanece vazio antes de uma cheia é chamado de volume de espera. O cálculo deste volume pode ser realizado de maneira inversa ao cálculo do volume útil proposto por Rippl em 1883 e por Waitt em 1945 (*apud* Kelman, 1987).

Kelman (1987) cita que os volumes de espera assim calculados não correspondem à probabilidade de risco de inundação à jusante, visto que as vazões futuras não serão exatamente iguais às do passado, utilizadas no cálculo desses volumes.

Beard em 1963 (*apud* Kelman, 1987) ajustou a distribuição de probabilidades Log Pearson Tipo III para a variável $Y(d)$ (volume afluente em d dias do método de Waitt) a qual permite construir a curva volume versus duração associada a uma probabilidade. Isso permite o cálculo do volume útil com uma probabilidade de risco.

A utilização do volume de espera durante o ano inteiro não é adequada, visto que em período seco a probabilidade de cheia é pequena. Para resolver esse impasse utiliza-se a trajetória crítica. Trajetória crítica é uma curva associando o volume de espera ao dia do ano (tempo). Desta maneira em períodos secos do ano o volume de espera é menor.

A envoltória das trajetórias críticas obtida com vários anos dos dados históricos é chamada de curva limite. Tavares e Kelman (1985) introduziram a noção de risco no conceito de curva limite. Para isso, não utilizaram todos os anos do histórico para obter a curva limite. Portanto, o risco associado é $\alpha = k/n$ sendo k

o número de anos utilizados e n o número de anos. Podem-se utilizar também séries sintéticas se o número de anos for muito pequeno. Com este método pode-se criar várias curvas limites, uma para cada tempo de recorrência de inundação a jusante.

A utilização da curva limite não leva em conta previsões de vazões, pois utiliza somente dados históricos e/ou sintéticos. Com a utilização de previsão de vazões pode-se otimizar a utilização deste volume de espera. Por exemplo, quando a previsão de vazões indica que não vai ocorrer uma cheia, então pode-se diminuir o volume de espera inicialmente calculado pela curva limite. Essa diminuição pode ser calculada por modelos de otimização junto com previsões de vazões.

Existem vários modelos de otimização que podem ser utilizados na operação dos reservatórios: programação linear, programação determinística, programação dinâmica, programação dinâmica estocástica, programação não linear, sistemas inteligentes e modelos de simulação. A escolha do melhor método de otimização depende das particularidades de cada caso (Lima e Lanna, 2005). Os métodos não lineares de sistemas inteligentes, entre elas a lógica difusa (Zadeh, 1965), não necessitam de hipóteses simplificadoras o que permite serem utilizados em uma maior gama de problemas. Russell e Campbell (1996) comentam que a lógica difusa não substitui as demais técnicas para a otimização da operação de reservatórios, entretanto pode ser uma importante ferramenta auxiliar. A lógica difusa é muitas vezes utilizada conjuntamente com outras técnicas para resolver o problema de otimização como, por exemplo: programação dinâmica estocástica (Mousavi *et al.*, 2004; Moeini *et al.*, 2011) e rede neural (Deka e Chandramouli, 2009). Entretanto, Dubrovin *et al.* (2002) mencionam que não tiveram bons resultados com modelo de lógica difusa para a operação de reservatórios em tempo real para controle de cheias.

Seja qual for o modelo de otimização um bom modelo de previsão de vazões é primordial. No século passado quando as previsões meteorológicas não eram muito desenvolvidas se utilizava modelos estocásticos de previsão de vazões, muitas vezes utilizados também para planejamento. Como exemplos têm-se os modelos Arma (Box e Jenkins, 1976 *apud* Kelman 1987a) utilizado por Braga (1983); Parma (Salas *et al.*, 1982).

Outra maneira de previsões de vazões é a utilização de modelos hidrodinâmicos baseados em equações diferenciais que inicialmente foram apresentadas por Yen (1975) e Chen (1973) e modelos de propagação

simplificados como o Muskingum (McCarthy, 1938) que se baseia em variações do armazenamento de água na calha do rio. Ambos preveem vazões num local com base nas vazões medidas em estações fluviométricas a montante.

Modelos do tipo chuva-vazão foram inicialmente utilizados com dados observados de precipitação (pluviômetros) o que permite a previsão de vazões apenas para os instantes iniciais com horizonte de previsão até ou igual ao tempo de concentração da bacia.

Com o desenvolvimento e a melhoria dos modelos de previsões meteorológicas se começou a utilizar os modelos chuva-vazão com as precipitações previstas como, por exemplo, em Andreolli (2003). Devido à grande incerteza ainda existente nas previsões pluviométricas se começou a utilizar, na última década, as previsões pluviométricas por conjunto. Estas previsões são conhecidas pelo seu termo em inglês “*Ensemble*” e consiste em ter várias previsões pluviométricas possíveis, ou seja, um conjunto de previsões.

Alguns autores não obtiveram bons resultados num *ensemble* hidrológico (*ensemble* pluviométrico mais modelo chuva-vazão). Olsson e Lindstron (2008) obtiveram um *ensemble* hidrológico que subestima as vazões. Velázquez *et al.* (2009) obtiveram um modelo não confiável. Estes autores utilizaram um período curto para calibração e verificação dos modelos além de utilizarem uma baixa resolução do *ensemble* pluviométrico em relação ao tamanho das bacias hidrográficas utilizadas. Entretanto Renner *et al.* (2009) obtiveram bons resultados utilizando modelos do tipo *ensemble* hidrológico para bacias hidrográficas maiores e uma resolução do *ensemble* pluviométrico mais detalhado (*grid* 10 km x 10 km). Portanto eles recomendam a substituição da utilização do modelo meteorológico Global pelo Local.

Outra maneira de melhorar um *ensemble* hidrológico é a utilização de uma mistura de vários modelos meteorológicos (*ensemble* pluviométrico) associados a vários modelos hidrológicos (Brochero *et al.*, 2011).

Xuan *et al.* (2009) afirmam que *ensemble* hidrológico agrega uma ampla gama de informações das incertezas no processo.

Autores como Zhao *et al.* (2011) e Meller (2012) mostraram as vantagens da utilização de *ensemble* em relação a sua não utilização numa previsão de vazões. “*Para eventos dicótomos as previsões por conjunto mostraram significativa superioridade em relação à previsão determinística e mesmo a média do conjunto,*

sendo possível obter, na maior parte dos casos analisados, uma indicação da ocorrência do evento de cheia com uma maior antecedência” (Meller, 2012). Sendo um evento dicotômico do tipo: 0 = não aconteceu uma cheia e 1 = aconteceu uma cheia, a afirmação de Meller mostra que os modelos de previsão por *ensemble* são superiores para alertas de enchentes à população, pois conseguem prever enchentes com maior antecedência.

O modelo de previsão de vazão em tempo real, LARSIM, de Gerlinger e Demuth (2011) é um caso real de aplicação de previsões por *ensemble* para alertas de cheias no rio Moselle na Europa.

LACTEC e DELTARES (2017) utilizaram o FEWS, uma ferramenta que integra vários módulos (previsão de chuva, modelo chuva-vazão Sacramento, otimização de reservatório e modelagem hidrodinâmica) para servir de ferramenta na utilização *online* da operação dos reservatórios no controle de cheias. Eles utilizaram uma abordagem de otimização parecida com a de Raso *et al.* (2012) e Raso *et al.* (2013). Raso *et al.* (2012; 2013) utilizaram modelo de controle preditivo com programação estocástica multi-estágio para a operação *online* de reservatórios para controle de cheias. Este modelo consiste em um conjunto de previsões meteorológicas (*ensemble forecasting*), com suas respectivas probabilidades, que são selecionados à medida que o tempo passa através de ramificações de uma “árvore” e por técnicas bayesianas têm suas probabilidades atualizadas. O modelo de Controle Preditivo MPC, *Model Predictive Control* (Van Overloop, 2006) é uma adaptação da Teoria de Controle (Zabczyk, 1993) de tal maneira que os controladores (solução do problema) possam ser aplicados antes da realização do fato através de utilização de otimizadores e previsão de vazões.

Boucher *et al.* (2012), compararam e analisaram o efeito da previsão por *ensemble* nas variáveis pós-operação do reservatório (energia gerada, abatimento do hidrograma de cheia) e sugeriram mais estudos a respeito.

A teoria dos conjuntos difusos e lógica difusa introduzida por Zadeh (1965) tem sido usada para representar incertezas de modelos ou de informações. Nos recursos hídricos existem muitas incertezas tanto em dados como nas estruturas dos modelos, portanto a teoria difusa tem sido utilizada em vários campos de recursos hídricos como, por exemplo, na consistência de dados pluviométricos (Abebe *et al.*, 2000), na modelagem de sistemas hidroclimatológicos (Bardossy *et al.*, 1990, Galambose *et al.*, 1999), na operação de reservatórios (Panigrahi e

Mujumdar, 2000), na estimativa da recarga subterrânea (Coppola, Duckstein e Davis, 2002) além de outros campos da hidrologia e meteorologia.

Özelkan e Duckstein (2001) utilizaram conceitos de aritmética difusa (Kaufmann e Gupta, 1991), e regressão difusa (Özelkan, 1997) para obter um modelo chuva-vazão com o conceito difuso onde a incerteza de todos os parâmetros do modelo Sacramento (SAC-SMA) foram tratados como variáveis difusas. O modelo proposto, que também utiliza a lógica difusa, ajuda os tomadores de decisão no entendimento e na sensibilidade dos parâmetros do modelo Sacramento.

Yu *et al.* (2000) apresentaram um modelo de previsão de chuva, cujos parâmetros foram estimados através da regressão por metas difusas. Yu e Chen (2005) utilizaram lógica difusa para realizar a atualização das variáveis de saída de um modelo de previsão de vazão determinístico em tempo real. Eles utilizaram um modelo de previsão de chuva chamado de Grey (Chen, 1998; Yu *et al.*, 2000), modelo chuva-vazão Grey (Chen, 1998; Yu *et al.*, 2001) e o modelo de propagação de vazão Muskingum modificado (O'Donnell, 1985; Khan, 1993) para previsão de vazões futuras quatro horas à frente. A lógica difusa foi utilizada para corrigir os erros deste modelo obtendo sucesso.

2.2 LÓGICA DIFUSA

A lógica difusa é baseada no conceito de verdade parcial onde 0 representa a “não verdade”, 1 representa a verdade absoluta e um número intermediário representa a verdade parcial. Em 1965 o termo lógica difusa foi introduzido por Zadeh (1965) no qual o autor apresenta também os conceitos de conjunto difuso, termos linguísticos e suas funções chamadas de pertinência.

A lógica difusa é aplicada em várias áreas, como a teoria de controle (tomada de decisão), otimização entre outras.

2.2.1 A Teoria da Lógica Difusa

O conceito de verdade parcial nos diz que nem sempre uma afirmação é somente falsa ou verdadeira podendo ser parcialmente verdadeira, como por exemplo, uma pessoa careca não é somente aquela que não tem nenhum cabelo.

Uma pessoa que tem apenas dois fios de cabelo é considerada careca. Neste caso ela é careca, mas não totalmente.

Qualquer grandeza pode ser agrupada em vários termos linguísticos, por exemplo, temperatura pode ter como termos linguísticos: congelante, muito frio, frio, fresco, agradável, quente, muito quente e escaldante. Neste caso temperaturas podem ser agrupadas com conjuntos difusos conforme o termo linguístico a qual pertence. Na teoria difusa uma temperatura pode ser, por exemplo, ao mesmo tempo quente e muito quente. Isto acontece porque a noção de o que é quente ou muito quente e o limite entre as duas são subjetivos, pois é uma noção do pensamento humano. Daí surge o conceito de grau de pertinência.

O grau de pertinência é o quão verdadeiro seria uma afirmação se uma variável assume uma expressão linguística. O grau de pertinência varia entre zero “0” (totalmente falso ou certamente não pertence ao conjunto difuso) e um “1” (totalmente verdadeiro, pertence ao conjunto difuso). Por exemplo, uma temperatura de 5° C pode ser congelante para alguém e pode ser muito frio para outro, mas certamente não seria escaldante. Então 5° C tem grau de pertinência entre 0 e 1 para muito frio e também para congelante e grau de pertinência zero para escaldante.

As funções de pertinência definem o grau de pertinência de uma variável através de uma equação que envolve o valor da variável. Existem vários tipos de função de pertinência e as mais utilizadas são a triangular e a trapezoidal, pela sua simplicidade na utilização. A Figura 1 apresenta o exemplo da variável temperatura, os termos linguísticos, e as funções de pertinência da temperatura. Nesta figura pode-se ver uma função de pertinência triangular (Agradável) e uma função de pertinência trapezoidal (Quente). Pela figura uma temperatura de 22,5°C tem grau de pertinência de 0,5 para agradável, 0,5 para fresco e zero (0,0) para os demais termos linguísticos.

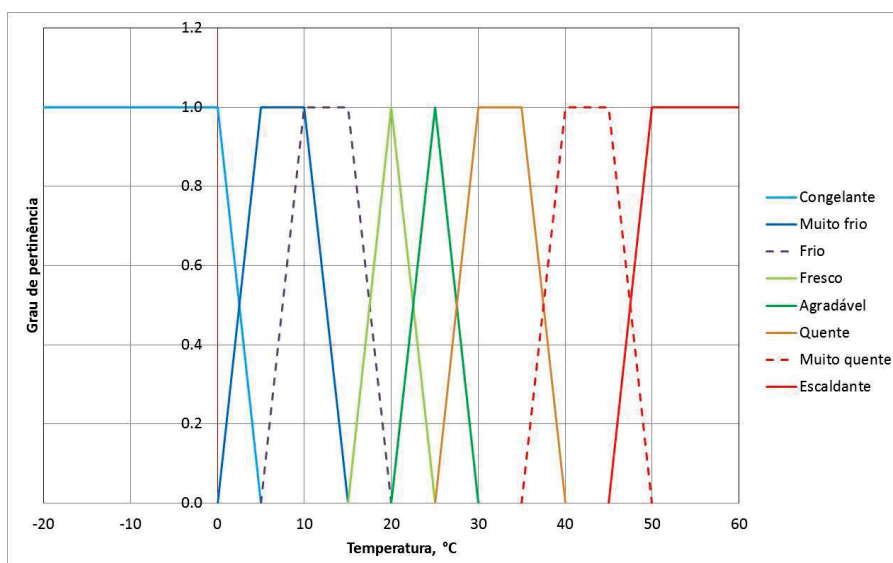


Figura 1 - Exemplo de termos linguísticos e funções de pertinência

A lógica difusa imita a habilidade humana de tomar decisões em um ambiente de incerteza e imprecisão. A lógica difusa utiliza regras linguísticas (também chamadas de regras difusas) que são expressões linguísticas envolvendo os termos “se”, “então”, “e”, e “ou” que expressam uma relação entre variáveis difusas. Estas regras são geralmente obtidas através da experiência humana (especialistas) ou obtidas de dados históricos (observados). Exemplo de regras difusas:

- Se a temperatura for fria e preço da energia elétrica for barato então o aquecimento seria alto,
- Se a temperatura for fria e energia elétrica for cara então o aquecimento seria baixo,
- Se a temperatura for congelante, então o aquecimento seria super alto,
- Se a temperatura for agradável ou Fresca, então o aquecimento seria nulo,

Há dois métodos para inferência difusa: o Mamdani e o Sugeno. A inferência Mamdani, criada por Mamdani e Assilina (1975), tem 4 etapas:

- **Fuzificação** das variáveis de entrada: convertem dados de entrada *crisp* (valor numérico) em termo linguístico através de funções de pertinência.
- Inferência difusa: utiliza a regras difusas para converter dados de entrada difusos em dados de saída difusos do problema a ser resolvido.
- Agregação das saídas: agrega as saídas difusas das várias regras em uma saída única difusa para cada variável.

- Defuzificação: transforma variável de saída difusa em variável *crisp* (valor numérico).

Existe 5 métodos de defuzificação:

- Centroide da área: o valor *crisp* ocorre no centro de gravidade da área sob a função de pertinência;
- Máximo: o valor *crisp* é obtido onde ocorre o máximo grau de pertinência;
- Média dos máximos: quando o máximo grau de pertinência ocorre numa faixa de valores, obtém-se o valor *crisp* através da média destes valores;
- Altura: média ponderada dos centros de gravidade das funções de pertinência de cada regra. Os pesos são os graus de pertinência máximo de cada regra. Utilizada em funções de pertinência simétricas onde se sabe facilmente onde é o centro de gravidade.

A Figura 2 apresenta esquematicamente o processo de inferência difusa utilizando as regras difusas envolvendo 3 variáveis difusas x , y e z que podem assumir os termos linguísticos $A1$, $A2$, $A3$; $B1$, $B2$ e $C1$, $C2$, $C3$ respectivamente. A figura mostra que a pertinência para a variável de saída z (consequente) é a máxima das pertinências das variáveis de entrada x , y (antecedentes) caso utilize a expressão “ou” e a mínima das pertinências caso se utiliza a expressão “e”.

A Figura 3 apresenta o esquema da agregação: transformação das três saídas difusas para z em uma única saída difusa para Z .

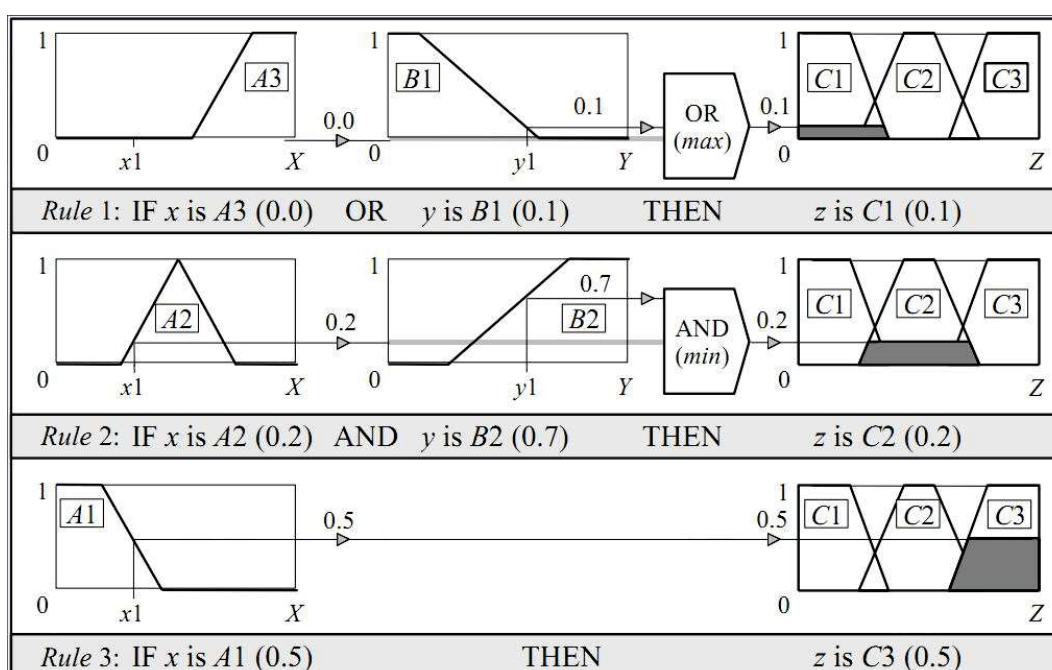


Figura 2 - Inferência difusa pelo método de Mamdani. Fonte: Hamed, B (2016)

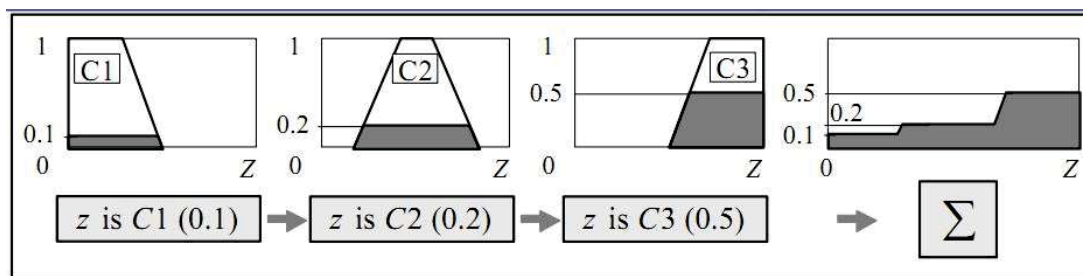


Figura 3 - Agregação pelo método de Mamdani. Fonte: Hamed, B (2016)

Outro método de inferência difusa é denominado de Takani-Sugeno-Kang ou simplesmente Sugeno que foi desenvolvido por Takani e Sugeno (1985). A diferença para o método de Mamdani é que o consequente (saída de uma regra difusa) é uma equação matemática em função das variáveis de entrada. Esta equação pode ser inclusive uma constante. A Figura 4 ilustra esquematicamente o processo de inferência difusa pelo método Sugeno para funções constantes no consequente e utilizando as regras difusas envolvendo 3 variáveis difusas x , y e z que podem assumir os termos linguísticos $A1$, $A2$, $A3$; $B1$, $B2$ e z pode assumir os valores *crisp* $k1$, $k2$, $k3$. A agregação das regras em um único valor de z é feita através da média ponderada dos valores de z de cada regra com pesos sendo os graus de pertinência resultante das regras difusas. No exemplo da Figura 4, z seria a média ponderada de $k1$, $k2$, $k3$ com os pesos 0,1, 0,2 e 0,5 respectivamente.

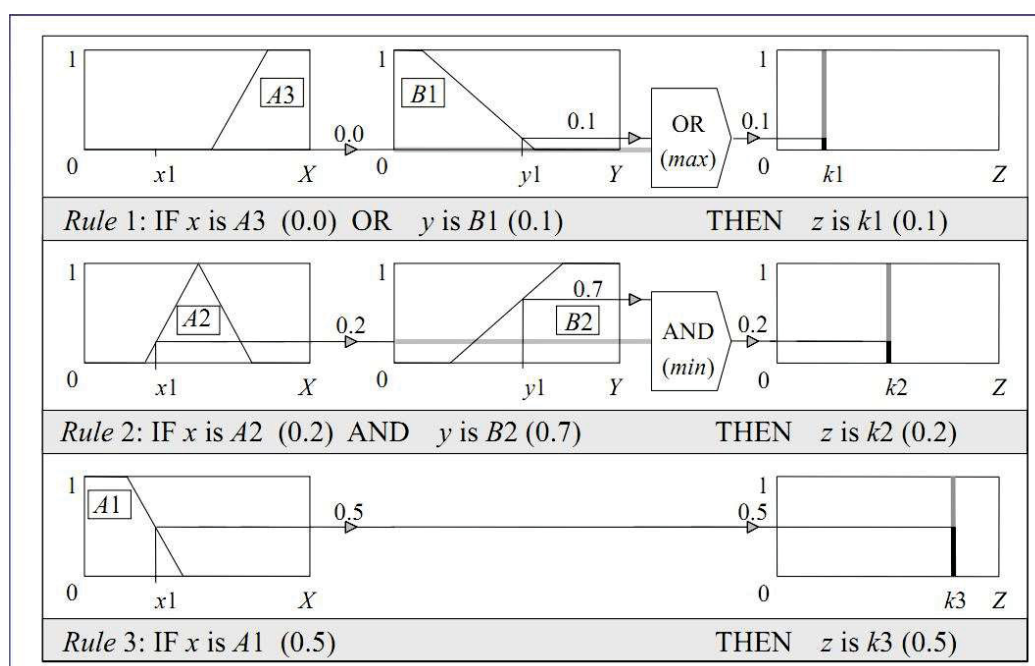


Figura 4 - Inferência difusa pelo método de Sugeno. Fonte: Hamed, B (2016)

Seguem na próxima seção, alguns exemplos de aplicação da lógica difusa em otimização da operação de reservatórios e previsão de vazões.

2.2.2 Modelos de Tomada de Decisão através de Lógica Difusa

Varios pesquisadores têm usado técnicas de lógica difusa na área de operação de reservatórios que envolve tomada de decisão envolvendo incertezas e conflitos de interesse, entre eles Yin *et al.*, (1999), Fontane *et. al.*, (1997); Owen *et al.*, 1997; Russell e Campbell, 1996; Shrestha *et al.*, 1996 todos citados por Gilbertoni (2002).

Lima (2006) investigou o potencial das técnicas dos sistemas inteligentes: Lógica difusa, redes neurais e sistemas híbridos neuro-difusos para a sua utilização na tomada de decisão na operação de sistemas de reservatórios. Os resultados mostram que as duas primeiras (lógica difusa e redes neurais) são caminhos eficientes e efetivos para a obtenção de políticas operacionais de sistemas complexos de reservatórios, o que não ocorreu com o sistema neuro-difuso. O estudo de caso foi o sistema de reservatório que abastece a cidade de Fortaleza em região semiárida e por isso com ênfase na escassez de água.

Fu (2008) apresentou um método de otimização difusa baseado no conceito de pontos ideais e anti-ideais para resolver problemas de tomada de decisão em ambientes nebulosos com multicritérios. Os valores quantitativos dos critérios de cada alternativa são representados por números *fuzificados* triangulares e os seus homólogos qualitativos e o peso de cada critério é descrito por termos linguísticos, os quais podem também ser expressos como números *fuzificados* triangulares no método proposto. Obtém-se assim uma matriz de decisão *fuzzy* onde o elemento x_{ij} é um número *fuzzy* padronizado (valor de 0 a 1) representando o valor (benefício ou custo) da alternativa i pelo critério j . O peso de cada critério na alternativa j é designado por variáveis linguísticas difusas. Uma média ponderada dos x_{ij} percorrendo j dá um valor difuso para comparação entre as alternativas. Entretanto diversas maneiras de defuzzificação podem gerar várias conclusões divergentes. Com a definição das distâncias difusas ponderada ideal e não ideal, uma função objetivo é construída para obter a ótima avaliação para cada alternativa indicada por um grau de pertinência *fuzzy*. O método proposto foi demonstrado por um estudo na operação de controle de cheias do reservatório de Sanmemxia (Yellow

river, China). Além disso, este método pode ser facilmente integrado com o sistema de modelagem de reservatório para avaliar as estratégias de controle de inundações automaticamente, portanto, fornece apoio à tomada de decisão.

Gu *et al.* (2012) apresentam um algoritmo para resolver o problema de tomada de decisão para múltiplos reservatórios em paralelo utilizando lógica *fuzzy*. Eles utilizam uma programação dinâmica difusa e os reservatórios são tratados como fases (etapas), de modo que o problema torna-se um sistema de tomada de decisão multi-objetivo e multi-fase.

2.2.3 Otimização e Lógica Difusa

Russell e Campbell (1996) utilizaram a lógica difusa em um reservatório de finalidade única em que ambas as vazões e o preço de venda de energia podem variar. Os resultados são comparados com os obtidos pela programação dinâmica determinística com retrospectiva. O uso da lógica *fuzzy* com previsões de vazões também foi investigado. A conclusão é que a abordagem com lógica *fuzzy* é promissora, mas sofre com a "maldição da dimensionalidade". Russell e Campbell comentam que a lógica *fuzzy* pode ser um complemento útil para outras técnicas de otimização convencionais, mas, provavelmente, não uma substituição.

Dubrovin *et al.* (2002) desenvolveram um modelo de operação em tempo real para o reservatório com multi-objetivo utilizando o método de inferência *fuzzy* nomeado de "Modelo de Total Similaridade Difusa". O modelo utiliza pesos de importância para cada variável e para cada regra difusa. A variação sazonal em ambas as variáveis hidrológicas e metas operacionais foram examinadas considerando as entradas como valores relativos dependentes da estação do ano, ao invés de usar valores absolutos. O modelo calcula níveis de referência para cada época do ano através de inferência *fuzzy* e dados históricos. O modelo foi aplicado no Lago Paijanne na Finlândia e comparou-se os resultados com um método mais tradicional de *fuzzy*, tipo Sugeno. O desempenho do modelo foi relativamente bom, mas este não captura o pensamento de especialistas nas circunstâncias mais excepcionais. Isto ficou evidente na fase de calibração, em que o modelo não conseguiu o efeito de uma inundação excepcionalmente longa. No entanto, os autores comentam que essa desvantagem pode ser resolvida através da construção de uma regra específica que deve ser acionada em circunstâncias

especiais. Outro ponto fraco do modelo foi a sua incapacidade de ver para frente e para trás em várias janelas de tempo. Esta incapacidade levou à variação excessiva de liberação de água e inundações ao longo das margens do rio Kymijoki.

Moeini *et al.* (2011) apresentaram um modelo baseado em regras *fuzzy* para a operação de reservatórios de hidrelétricas. O modelo obtém as bases de conhecimento necessárias para a formulação das regras *fuzzy* através de um modelo de programação dinâmica estocástica (SDP). Nas regras *fuzzy* obtidas, o armazenamento do reservatório, a vazão de entrada (afluente ao reservatório) e o período são utilizados no antecedente e a vazão defluente como consequente. Foram atribuídas funções de pertinência para as variáveis: vazões afluentes ao reservatório, armazenamento e vazão defluente. Cada mês do ano tem uma função de pertinência diferente para a vazão afluente nas quatro estações do ano e se obtém 12 conjuntos de regras *fuzzy*, um para cada mês do ano. A função objetivo utilizada no modelo SDP minimiza o desvio entre a energia gerada e a capacidade instalada do sistema obedecendo às restrições de vazão máxima a jusante da equação de balanço hídrico do reservatório:

$$\text{Minimize } F = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P(t)}{PI}\right)^2 \quad (2.1)$$

$$P(t) = \min[(g\delta q(t)h(t), PI)] \quad (2.2)$$

Sendo $q(t)$ e $h(t)$ a vazão defluente e queda bruta líquida média no tempo t respectivamente, $P(t)$ e PI a potência gerada no tempo t e potência instalada respectivamente, g é a gravidade e δ é um coeficiente englobando rendimento, fator de planta, densidade da água e transformação de unidades. As vazões foram discretizadas em 5 classes e os volumes em 10 classes. Assim, obteve-se a matriz de transição de probabilidades que foi utilizada na equação recursiva no modelo SDP. O modelo proposto foi aplicado à operação hidráulica de um reservatório no Irã e os resultados foram apresentados e comparados com os do modelo de SDP. Os resultados indicam a capacidade do método para resolver os problemas de operação de reservatórios hidrelétricos e se apresentaram ligeiramente melhor que o modelo SDP. Segundo os autores, o modelo apresentado tem as vantagens de evitar os procedimentos complexos de otimização e ser flexível à interferência de peritos (opiniões de especialistas podem ser facilmente inseridas como novas regras *fuzzy*).

Mousavi *et al.* (2004) apresentaram um modelo chamado de programação dinâmica estocástica de estado difuso (FSDP) para a operação de reservatório. Segundo os autores, este método aproveita as vantagens tanto do modelo de programação dinâmica estocástica quanto de modelos baseados em regras fuzzy. O método calcula e utiliza uma cadeia de Markov difusa através de probabilidades de transição difusas e variáveis de estado difusas. Na cadeia de Markov difusa desenvolvida, os limites dos intervalos de classes possuem transições suaves, obtidas pelo conceito *fuzzy*. Consequentemente, os resultados do modelo de FSDP não são sensíveis a estes limites, o que teoricamente pode representar uma vantagem. Isto refletiu em resultados mais robustos quando aplicado em um reservatório no Irã. Na implementação do modelo são levadas em conta as incertezas devido à natureza aleatória das variáveis hidrológicas e a imprecisão devido à discretização das variáveis.

2.2.4 Modelos Hidrológicos e Lógica Difusa

Vários autores utilizaram técnicas de análise difusa em hidrologia entre eles vale citar os seguintes:

Campana (1995) *apud* Gilbertoni (2002) obtém um hidrograma unitário através de técnicas de regionalização baseada na regressão linear difusa.

Özelkan e Duckstein (2001) utilizaram conceitos de aritmética difusa (Kaufmann e Gupta, 1991), e regressão difusa (Özelkan, 1997) para obter um modelo chuva-vazão com o conceito difuso onde as incertezas de todos os parâmetros do modelo Sacramento (SAC-SMA), foram tratadas como variáveis difusas. O modelo utilizando regressão difusa obteve leve melhora sobre o modelo Sacramento, porém não produziu melhoras quando utilizou uma regressão normal para a bacia hidrográfica localizada no estado do Arizona nos Estados Unidos. De qualquer maneira o método proposto por eles duplica a quantidade de parâmetros (pois cada parâmetro origina dois parâmetros, um para o limite máximo e outro para o limite mínimo) o que pode ser uma desvantagem.

Gilbertoni (2002) utilizou técnicas de análise difusa, mais especificamente a análise de agrupamento de dados ("*c-means*") e regressão por metas difusas para a realização da regionalização de parâmetros hidrológicos relacionais a vazões médias diárias e vazões máximas anuais. A autora concluiu que a utilização destas

ferramentas fornece resultados melhores que os obtidos com a utilização de métodos estatísticos padrões.

Yu e Chen (2005) utilizaram lógica difusa para realizar a atualização das variáveis de saída (ou correção dos erros do modelo) de um modelo de previsão de vazão determinístico em tempo real composto do modelo de previsão de chuva chamado de Gray (Chen, 1998; Yu *et al.*, 2000), modelo chuva-vazão Grey (Chen, 1998; Yu *et al.*, 2001) e o modelo de propagação de vazão Muskingum modificado (O'Donnell, 1985; Khan, 1993) para previsão de vazões futuras 4 horas à frente. Eles fuzzificaram as saídas dos modelos citados (vazões previstas em 3 locais da bacia hidrográfica) e uma regra difusa que basicamente nos dizem que se as vazões previstas forem iguais às observadas, o erro seria zero. Eles obtiveram um parâmetro das funções de pertinência exponencial através da calibração para um período histórico. Com a correção dos erros proporcionado pelo método de interferência difusa, houve uma melhoria na previsão tanto na magnitude do pico quando tempo para o pico da vazão, para os eventos utilizados.

Freitas e Kaviski (2014), *apud* Freitas (2016), desenvolveram um modelo de previsão de vazão através da lógica difusa. Neste modelo as vazões de estações fluviométricas a montante tiveram as vazões definidas como variáveis linguísticas (média, alta e baixa) sendo que as regras difusas correspondem a equação de regressão cujos coeficientes variam conforme o estado das vazões em cada estação fluviométrica. A lógica difusa serviu para definir os parâmetros da equação de regressão para 27 situações hidrológicas distintas. Este modelo de previsão foi utilizado em Freitas (2016) para a operação de um sistema de reservatórios em cascata.

2.3 PREVISÕES DE VAZÕES

Neste tópico descrevem-se as etapas para a modelagem da previsão de vazão necessária na utilização da otimização da operação de um reservatório para alerta e contenção de cheias.

A previsão de vazões em rios tem uma ampla gama de aplicações. Tucci e Collischonn (2007) citam exemplos de aplicações de previsões em: operação de obras hidráulicas como reservatórios, sustentabilidade hídrica para agricultura,

abastecimento de água, produção de energia, determinação das condições de navegação dos rios e no controle de inundações.

Como exemplos de aplicação em previsão de cheias para sistemas de alerta de inundação tem-se o Sistema de Alerta Contra Enchentes do Rio Doce, operado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), operado desde 1997 (Pinto *et al.* 2005). A COPEL tem seu sistema de previsão de cheias e operação do reservatório de Foz do Areia com sistema de alerta para a cidade de União da Vitória. A Cemig está implementando o Sistema de previsão de vazões por *ensemble* interligado com a operação de reservatório e sistema de alerta em várias bacias de Minas Gerais.

Há três conceitos associados à previsão de vazões: horizonte, discretização e a frequência. Por exemplo, em um determinado local ocorrem previsões de vazões a cada 12 horas e as previsões são de vazões horárias de janelas de 7 dias. Neste exemplo a discretização é horária, frequência de 12 horas e horizonte de 7 dias.

Previsões com horizonte de horas ou dias são também chamadas de previsões em tempo real ou previsões de curto prazo. São utilizadas para a operação de reservatórios e para previsão de cheias e sistemas de alerta a inundação. Previsões de longo prazo (horizonte maior) são geralmente utilizadas para planejamento.

Existem vários modelos matemáticos utilizados na previsão de vazões. Os modelos estocásticos, modelos de regressão entre variáveis, redes neural e lógica difusa capturam características da série histórica para gerar as previsões não modelando o aspecto físico da hidrologia. Um exemplo típico deste tipo de modelo é o modelo autoregressivo Arma (p,q). Outros modelos levam em conta a causa e efeito dos fenômenos físicos envolvidos no ciclo hidrológico representados geralmente por fórmulas e/ou reservatórios fictícios para representar o armazenamento de água na bacia hidrográfica. Como exemplos tem-se o Sacramento, o MGB-IPH (UFRGS, 2014) e o Topmodel (Beven et al, 1984).

Os modelos podem ser distribuídos ou concentrados. Nos modelos distribuídos a modelagem é realizada por microbacias ou por *grid* retangular e depois integrada para obter as vazões na exutória de toda a bacia hidrográfica. Nestes é possível representar a variabilidade espacial das variáveis. Nos modelos

concentrados a bacia hidrográfica é tratada como uma entidade única. Para os modelos distribuídos a modelagem é feita em duas etapas: modelo chuva-vazão e modelo hidrodinâmico sendo este último necessário para transferir os hidrogramas das sub-bacias para a exutória da bacia total.

Em bacias muito grandes que possuem estação fluviométrica telemétrica no rio principal a montante do ponto onde se quer realizar a previsão, a previsão de vazões pode ser realizada através de uma modelagem hidrodinâmica deste ponto até a exutória desejada e a modelagem chuva-vazão na bacia incremental. Outras técnicas também são possíveis, neste caso, como correlação com uma ou várias estações fluviométricas a montante e/ou podendo dispensar o modelo chuva-vazão se a área incremental for desprezível.

Exemplo de utilização de modelo autoregressivo para a previsão de vazões para operação em tempo real é mostrada em Mine (1984) e Mine (1998). Mine (1984) analisou a viabilidade da utilização de modelos auto regressivos integrados de média móvel, ARIMA(1,1,0) baseado apenas em vazões e o modelo de função de transferência, TFM(1,1,0), baseado em vazões e precipitações para previsão de vazões. Em bacias hidrográficas de resposta rápida o TFM apresentou melhores previsões de vazões que o ARIMA, principalmente na fase de ascensão dos hidrogramas. O modelo ARIMA, por utilizar somente vazões em tempos anteriores, apresenta o inconveniente de prever vazões sempre atrasadas na subida dos hidrogramas. A autora comenta que a previsão de chuvas se constitui no maior problema da previsão hidrológica e deverá ser abordada em pesquisas futuras.

Em Mine (1998), a autora utilizou previsão de vazões para criar volumes de espera para o reservatório de Foz do Areia em tempo real. A abordagem foi conjugada estocástica-determinística. Para a previsão em União da Vitória (bacia hidrográfica de 24.000 km²) a autora utilizou um modelo estocástico ARIMA (2,1,0) o que se justifica pela reposta lenta da bacia hidrográfica, com grande armazenamento. Para a previsão na bacia incremental entre União da Vitória e Foz do Areia (6000 km²) usou o modelo determinístico IPHII, o que se justifica pela resposta rápida da bacia hidrográfica, e porque o modelo ARIMA forneceria previsões atrasadas, conforme comentado no parágrafo anterior. Ainda, os volumes de espera foram muito reduzidos com esse sistema de previsão, penalizando menos a geração de energia, quando admitiu uma previsão estocástica de chuva através de um modelo ARMA (1,1) do que quando previu que a chuva iria parar no

próximo intervalo de previsão. O ARMA (1,1) não consegue reproduzir as máximas intensidades de chuva, mas mostrou a importância da previsão de chuvas em operação de reservatórios, com a redução dos volumes de espera em tempo real. A autora concluiu que o trabalho conjunto, dentro deste contexto, entre hidrólogos e meteorologistas, deveria prosseguir pela sua relevância.

2.3.1 Modelo Sacramento chuva-vazão

O modelo Sacramento, desenvolvido pelo “*National Weather Service*” (NWS) dos Estados Unidos, é um dos modelos operacionais há mais tempo em uso como previsor de vazões para uma série de bacias naquele país (Krauskopf Neto, 2005).

É um modelo relativamente simples, mas capaz de representar com eficiência o processo hidrológico. Além disto, é utilizado em várias partes do mundo, tanto para fins de estudo como para gerar previsões operacionais. Em função do seu tempo de utilização, existe um considerável acervo de conhecimentos sobre todos os aspectos do modelo, tanto conceituais como operacionais.

O modelo hidrológico conceitual Sacramento simula vazão a partir de séries contínuas de precipitação e evapotranspiração potencial. A geração de vazões é baseada na subdivisão do solo em duas camadas principais (*top* e *bottom layers*). Na primeira são representados os processos mais rápidos que ocorrem ao nível de superfície (evaporação, infiltração, escoamento superficial e subsuperficial). Na camada inferior ocorrem os processos lentos, tais como, transpiração, recarga do aquífero e escoamento de base (DELTARES, 2013).

Em ambas as camadas, são consideradas as regiões onde a água está ou sob o efeito da capilaridade ou da pressão hidrostática. Desta forma, é possível definir ao menos quatro reservatórios de armazenamento distintos. O mecanismo básico do modelo considera que se a capacidade máxima do reservatório superior for excedida, a água se tornaria disponível para armazenagem no segundo reservatório superior. O enchimento dos reservatórios inferiores passa por processos similares (DELTARES, 2013). A Figura 5 apresenta a esquematização de funcionamento do modelo Sacramento.

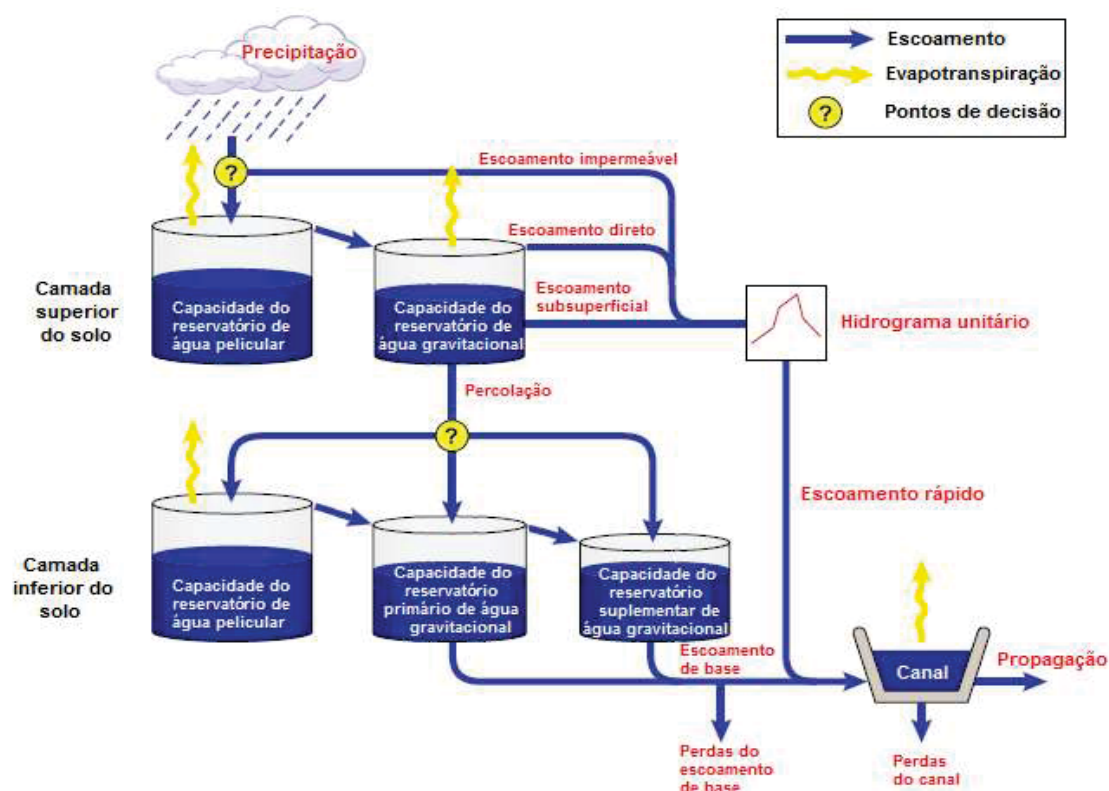


Figura 5 - Esquematisação de funcionamento do modelo hidrológico Sacramento
Fonte: adaptado de CRC (2004)

A calibração do modelo Sacramento envolve a quantificação de dezessete parâmetros (Tabela 1). Destes parâmetros: cinco definem o tamanho dos reservatórios não saturados; três calculam a taxa de perdas laterais; três calculam a percolação da zona não saturada superior para a inferior, e dois avaliam o escoamento direto. Alguns destes parâmetros podem ser obtidos através da análise dos hidrogramas, outros podem ser derivados de características fisiográficas da bacia e outros através de tentativa e erro. Outra forma de obtenção dos parâmetros é através da utilização de algoritmos de auto calibração baseados em técnicas de otimização global, considerando diferentes métricas.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo chuva-vazão Sacramento

Parâmetro	Unidade	Descrição
UZTWM	mm	Capacidade do reservatório de água pelicular (camada superior do solo)
UZFWM	mm	Capacidade do reservatório de água gravitacional (camada superior do solo)
LZTWM	mm	Capacidade do reservatório de água pelicular (camada inferior do solo)
LZFSM	m	Capacidade do reservatório suplementar de água gravitacional (camada inferior do solo)
LZFPM	mm	Capacidade do reservatório primário de água gravitacional (camada inferior do solo)
UZK	1/dia	Taxa de drenagem do reservatório de água gravitacional (camada superior do solo)
LZSK	1/dia	Taxa de drenagem do reservatório suplementar de água gravitacional (camada inferior do solo)
LZPK	1/dia	Taxa de drenagem do reservatório primário de água gravitacional (camada inferior do solo)
PFREE	--	Fração da percolação destinada aos reservatórios de água gravitacional (camada inferior do solo)
REXP	--	Expoente da equação de percolação (percolação)
ZPERC	--	Máxima fração de aumento da demanda de percolação mínima (percolação)
RSERV	--	Capacidade de água gravitacional indisponível para transpiração (camada inferior do solo)
SIDE	--	Fração do escoamento de base total que compõe a perda de base (camada inferior do solo)
SSOUT	m ³ /s/km ²	Taxa fixa do aporte total ao canal que compõe a perda de base (camada inferior do solo)
PCTIM	--	Fração da área impermeável permanente da bacia (escoamento direto)
ADIMP	--	Fração máxima da área impermeável variável da bacia (escoamento direto)
SARVA	--	Fração da bacia coberta por espelhos de água ou alagadiça (escoamento direto)

2.3.2 Precipitações nas previsões de vazões

Conforme as características da bacia o tempo de resposta de uma chuva varia e depende do tempo de concentração. O tempo de concentração é definido como o tempo da gota d'água mais distante na bacia hidrográfica atingir a exutória, ou seja, o tempo quando toda a bacia hidrográfica está contribuindo para a vazão na seção da exutória.

Para previsões de vazões de curto prazo com horizonte inferior ao tempo de concentração a precipitação já ocorrida é a mais importante para a obtenção da previsão de vazão; quanto às precipitações futuras somente as ocorridas próximas

à exutória influenciam na vazão prevista. Para horizontes superiores ao tempo de concentração somente as precipitações previstas influenciam a vazão.

Portanto para as previsões de curto a médio prazo, no qual o horizonte de previsão ultrapasse o tempo de concentração, o modelo deveria ser alimentado com precipitações reais já ocorridas e com previsões das precipitações futuras.

2.3.2.1 Estimativas das precipitações ocorridas

A estimativa das precipitações já ocorridas pode ser obtida através de uma rede telemétrica de pluviômetros ou através de sensores instalados em radares e satélites ou ainda uma combinação de todas estas fontes de dados. As previsões de precipitações futuras são obtidas pela modelagem numérica da atmosfera.

A estimativa da precipitação por uma rede telemétrica terrestre tem a desvantagem de ser obtida por medições pontuais e, a menos que seja uma rede muito densa, pode não representar bem a variabilidade espacial da chuva. Outra desvantagem é manutenção (muitas vezes cara) dos equipamentos de telemetria e as falhas na obtenção do dado *online*. Entretanto a grande vantagem é a medição real da chuva efetivamente ocorrida.

Existem dois tipos de satélites, o estacionário e o de órbita polar. O estacionário está posicionado próximo ao equador numa órbita que acompanha a rotação da terra possibilitando a sua posição relativa fixa. Sua órbita é bem elevada para possibilitar um amplo alcance devido à curvatura terrestre. Este satélite geralmente possui sensores (radiômetros) operando no Infravermelho e no VIS (luz visível). Os satélites em órbita polar circulam a terra passando pelo Polo cobrindo toda a terra, porém com a frequência aproximada de 2 vezes ao dia, possuindo sensores (radiômetros) operando geralmente com micro-ondas.

Através dos sensores pode-se estimar a precipitação através de correlação indireta da temperatura ou brilho do topo das nuvens com a intensidade da precipitação que é mais adequado a chuvas convectivas, porém nem tanto para os demais tipos de chuvas (Scofield e Kuligowski, 2007). Os sensores de micro-ondas medem a emissão/absorção da radiação oriunda da precipitação. Segundo Engman (1993), a determinação da precipitação é realizada pela medição da energia termal das gotas de chuva.

Estimativas com sensores em micro-onda tendem a ser mais consistentes que os de infravermelho ou VIS (Dinku *et al.* 2010; Joyce *et al.* 2010), entretanto têm a desvantagem de se obter apenas duas imagens por dia por estarem em satélites polares enquanto que os satélites estacionários a frequência de medições é bem maior.

A obtenção da estimativa de precipitação utilizando os 3 tipos de sensores/satélites (VIS, infravermelho e micro-ondas) é o mais conveniente e são utilizados nos produtos CMORPH (Joyce *et al.*, 2004) e TRMM-TMPA (Huffman *et al.*, 2010). O CMORPH (*Climate Prediction Center Morphing Algorithm*) proporciona estimativas de precipitação global com resolução espacial de $0,0727^\circ \times 0,0727^\circ$ (~8 km) e com frequência temporal de meia hora entre as latitudes 60°N e 60°S . O TRMM-TMPA (*Multisatellite Precipitation Analysis*) apresenta campos de chuva utilizáveis entre os paralelos 50°N até 50°S , com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. A resolução temporal é variável, em função do produto.

Collischonn (2006), *apud* Meller (2012), foi um dos primeiros no Brasil a utilizar dados de satélites (TRMM-TMPA; $0,25^\circ \times 0,25^\circ$; 3 h) conjuntamente com modelagem hidrológica distribuída (MGB-IPH) na estimativa das vazões na UHE Três Marias, rio São Francisco em Minas Gerais. O resultado foi equivalente ao uso da rede terrestre de pluviômetros.

Araujo e Guetter (2007) utilizaram estimativas de precipitações do CMORPH (1 dia; $0,25^\circ$) para utilizar no modelo conceitual concentrado 3R (modificação do modelo chuva-vazão Sacramento) para gerar vazões diárias em União da Vitória, rio Iguaçu no Paraná. Na calibração foi utilizada a rede terrestre de pluviômetros e na simulação as estimativas do CMORPH. Utilizando o mesmo período de simulação e calibração obtiveram resultados similares.

2.3.2.2 Previsões de precipitação

A previsão do tempo é obtida através de modelagem numérica que representa a atmosfera e as integrações desta com a superfície dos oceanos e da terra através de um sistema de equações diferenciais não lineares, são os chamados modelos de previsão numérica do tempo (NWP- *Numerical Weather Prediction*). Várias variáveis atmosféricas estão envolvidas na modelagem (vento, temperatura, pressão, umidade, chuva, etc.) assim como fenômenos físicos

(turbulência atmosférica, radiação, biosfera-solo-atmosfera, etc.). Os dados necessários para estes modelos são coletados de satélites, aeronaves e do solo (terra e mar). As equações são resolvidas sobre uma grade tridimensional. Existem os modelos globais com *grid* mais grosseiro que abrange todo o globo terrestre, os modelos regionais que abrangem uma área menor e possuem um *grid* mais refinado, e os modelos de mesoescala ainda mais refinados, entretanto de menor abrangência. Por exemplo, o CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) disponibiliza os modelos Global-CPTEC com *grid* de 100 km, os regionais ETA (15 km de *grid*) e os MESOETA de 5 km de *grid* (Chou, 2015). Os modelos regionais e de mesoescala conseguem simular mais detalhes os fenômenos meteorológicos, o que pode ser uma vantagem para a modelagem hidrológica; entretanto o esforço computacional é maior e nem todas as regiões do globo são abrangidas por estas previsões.

Segundo vários autores (Golding, 2000; Xuan *et al.*, 2009; Hapuarachchi *et al.*, 2011) a previsão quantitativa da precipitação ainda continua a ser a maior fonte de incerteza nos resultados de previsões de cheias, apesar das incertezas dos modelos hidrológicos e da melhoria da previsão das precipitações.

Para representar a incerteza da previsão meteorológica utiliza-se a previsão por *ensemble* que consiste em alterar levemente as condições iniciais e/ou parâmetros do modelo meteorológico para obter vários cenários possíveis de precipitações futuras. Observou-se que estes modelos meteorológicos são muito sensíveis a pequenas variações das condições iniciais. A variação das condições iniciais pode ser considerada como a inserção da incerteza destas variáveis (medidas ou estimadas) e a variação dos parâmetros do modelo podem ser consideradas como a inserção da incerteza da representação estrutural do modelo atmosférico. Esta última incerteza pode também ser representada pela utilização de vários modelos diferentes de representação atmosférica na obtenção do *ensemble*.

Há vários institutos que fazem a previsão de tempo por *ensemble*, dentre eles o CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*). Este último disponibiliza o GEFS (*Global Ensemble Forecast System*). O *Thorpex Interactive Grand Global Ensemble* (TIGGE) disponibiliza uma base de dados de previsões por *ensemble* dos principais

institutos do mundo e do Brasil para a pesquisa científica no desenvolvimento de métodos para previsões probabilísticas.

2.3.3 Previsões de vazões por *ensemble*

As previsões de vazões por *ensemble* são obtidas utilizando o *ensemble* pluviométrico em um modelo hidrológico chuva-vazão obtendo assim um conjunto (*ensemble*) de hidrogramas previstos. Alternativamente pode-se obter esse *ensemble* hidrológico utilizando também vários modelos hidrológicos chuva-vazão. Seguem adiante exemplos de previsões de vazões por *ensemble*.

Olsson e Lindstrom (2008) utilizaram as previsões meteorológicas *ensemble* ECMWF e modelo hidrológico HBV para gerar vazões previstas em *ensemble* para um horizonte de 9 dias em 45 bacias hidrográficas da Suécia. Realizando testes estatísticos eles concluíram que as previsões por *ensemble* subestimam as vazões e esta tendência diminui com o horizonte de previsão. Segundo os autores este erro é proveniente da imprecisão do modelo meteorológico e do modelo hidrológico. Já a probabilidade da vazão prevista ultrapassar certo limite pré-estabelecido é superestimada nas previsões por *ensemble*, e segundo os autores este erro é proveniente principalmente das previsões meteorológicas, segundo os autores. Os autores propuseram um método que minimiza estas tendências melhorando as previsões. O método proposto para o ajuste das previsões é “alargar” o leque de previsões, aumentando as vazões de quantis acima da média e diminuindo para os quantis abaixo da média. Os valores a diminuir são constantes ao longo do tempo, mas variável em função dos quantis para cima e para baixo. Este valor constante a deslocar depende da vazão média do rio com funções apresentadas pelos autores. A metodologia e os testes foram realizados em bacias hidrográficas de pequeno a médio porte (8 a 6110 km²) com *grid* do *ensemble* meteorológico de 0,7° (60 km) o que corresponde a uma célula cobrindo toda a bacia aproximadamente. O horizonte de previsão utilizado foi de 9 dias e 51 membros do *ensemble*. Utilizou-se 18 meses de dados históricos o que segundo os autores é pouco para calibração e verificação o que pode afetar a generalização das conclusões e resultados.

Renner *et al.* (2009) avaliaram por meios estatísticos e probabilísticos as previsões de vazões através de *ensemble* de previsões meteorológicas e modelos chuva-vazão em várias estações fluviométricas do rio Reno (Alemanha)

abrangendo bacias hidrográficas de 50 mil a 160 mil km². Eles concluíram que estas previsões obtidas desta maneira são úteis e que o detalhamento da modelagem numérica meteorológica de Global para Local é recomendada; como por exemplo, a substituição do ECMWSF-eps (Global, *grid* 80 a 50 km) pelo Cosmo-Leps (local, *grid* 10 km) que foram os modelos por eles utilizados. Eles utilizaram o Delft-fews, modelo hidrológico HBV e o modelo de propagação de vazões Muskingum calibrados com dados de 9 anos (1990 a 1999) em 134 sub-bacias (calibradas separadamente). As previsões de vazões foram corrigidas por um modelo AR (auto regressivo) através da modelagem do erro ocorrido nas últimas 192 horas. Este modelo de correção deve ser aplicado a cada ponto da bacia modelada e melhora as previsões principalmente em curto período de tempo. Foram utilizados dados meteorológicos do Cosmo (9 meses) e do ECMWSF-eps (3 anos).

Velázquez *et al.* (2009) utilizaram um modelo hidrológico distribuído chamado “hydrotel” utilizando o *ensemble* de previsões do modelo meteorológico GEM, do serviço meteorológico do Canadá, que disponibiliza *ensemble* com 20 membros com *grid* de 100 km. Os resultados foram comparados com um modelo meteorológico determinístico com *grid* de 33 km. As bacias hidrográficas do Canadá utilizadas são de pequena dimensão (355 a 5830 km²) em relação ao *grid* meteorológico. Através de técnicas estatísticas eles concluíram que as previsões com *ensemble* possuem mais informações úteis. Entretanto, também concluíram que o sistema de previsão por *ensemble* utilizado não se apresentou confiável. Segundo os autores a causa da não confiabilidade pode ser ou pelo modelo meteorológico que apresentou um viés ou por uma má representação das condições iniciais do modelo hidrológico. Por fim, sugeriram aumentar o período de simulação, escolher outros modelos hidrológicos e uma melhoria na resolução do *grid* nas previsões meteorológicas.

Xuan *et al.* (2009) analisaram as incertezas da aplicação da previsão meteorológica por *ensemble* utilizando um modelo hidrológico distribuído. O estudo de caso foi numa bacia hidrográfica pequena (135 km²), no sul da Inglaterra, com alta densidade de dados pluviométricos e meteorológicos (radar e rede pluviométrica) o que permitiu uma boa caracterização do modelo hidrológico distribuído (GBDM). Eles utilizaram o ECMWF (100 x 100 km) para alimentar um modelo meteorológico de meso-escala com *grid* 2x2 km. Eles concluíram que previsões de vazão assim obtidas são comparáveis com as obtidas através de

pluviômetros, sendo capazes de agregar as informações das incertezas inerentes ao processo de modelagem; entretanto ocorreu um viés sistemático (subestimando as vazões) e esforços deveriam ser feitos para atenuar este problema.

Brown *et al.* (2010) apresentaram um *software* utilizado para verificar previsões por *ensemble* quantificando os erros (incertezas) e a habilidade de previsão através de vários testes estatísticos e probabilísticos.

Brochero *et al.* (2011) apresentaram uma maneira de diminuir o número de membros de um *ensemble* para aliviar a necessidade computacional. Para isso foi utilizada uma média ponderada de vários critérios de avaliação dos modelos e uma reamostragem dos dados pela metodologia da interrupção precoce (Hudson e Demuth, 2011 *apud* Brochero *et al.* (2011); Alpaydin, 2010) e validação cruzada. Os resultados validam a metodologia. Eles também mostraram que a utilização de uma mistura de vários *ensembles* meteorológicos e hidrológicos (ou seja, vários modelos atmosféricos e vários modelos hidrológicos) é melhor que somente o *ensemble* meteorológico aplicado em apenas um modelo hidrológico.

Franz e Hogue (2011) avaliaram e utilizaram métricas estatísticas e probabilísticas aplicadas em ciências atmosféricas para avaliar a qualidade de *ensemble* de previsões hidrológicas obtidas variando os parâmetros do modelo hidrológico. Eles utilizaram em 12 bacias hidrográficas no sudeste dos Estados unidos (1000 a 10000 km² de área de drenagem) avaliando o modelo de vazões diárias SAC-SMA (*Ensemble* gerado pelo “*National Weather Service Sacramento Soil Moisture Accounting*”), Burnash *et al.*, 1973 *apud* Franz e Hogue (2011). As vazões foram divididas em categorias para diminuir a influência de vazões baixas nas estatísticas de inundações. As métricas utilizadas permitiram obter informação de toda a gama de incerteza inserida num *ensemble* tendo, portanto, mais informação que as métricas tradicionais. Estas métricas “não tradicionais na hidrologia” incluem: correlação do valor observado com valores de vários quantis dos *ensembles*; fatorização da distribuição conjunta do valor observado (Murphy and Winkler, 1987 *apud* Franz e Hogue, 2011), que corresponde a mapear as probabilidades dos dados previstos caírem em faixas pré-estabelecidas; e Brier Score (BR) (Brier, 1950 *apud* Franz e Hogue, 2011) usados para eventos dicótonos. Devido ao fato da alta dependência entre vazões diárias poder afetar estas métricas sugeridas, os autores sugerem este tema para futuros trabalhos.

Gerlinger e Demuth (2011) apresentam um modelo de previsão de vazão em tempo real (LARSIM) utilizado na bacia hidrográfica do rio Moselle na Europa. O modelo utiliza dados medidos de precipitação e de vazões e previsão de precipitação *ensemble* por modelos numéricos de tempo de institutos da Alemanha e Austrália como o COSMO-DE, COSMO-EU, GME e INCA, sendo 4 com ótima resolução espacial (1 a 10 km) e outro com resolução de 40 km e horizontes de previsão de 21 a 174 horas. Para a utilização mais eficaz em tempo real o sistema realiza várias tarefas *online*: consistência de dados, correções das precipitações (e derretimento de neve), correção e atualização de estado hidrológico da bacia através de um modelo ARIMA. Mas especificamente o modelo LARSIM realiza as seguintes correções:

- A correção e otimização das precipitações e volume de neve: chuvas convectivas em pequenas áreas geram erros na estimativa da chuva ocorrida principalmente se a posição e densidade das estações meteorológicas e/ou pluviômetros não for conveniente. Esse erro é compensado parcialmente com uma adaptação, minimizando a diferença entre vazão observada e simulada antes do tempo inicial das previsões meteorológicas.
- Correção da cobertura de neve a ser derretida.
- A correção e otimização da vazão de base e superficial: é realizada uma adaptação no estoque inicial de água e parâmetros de vazão subterrânea.
- Também é realizada uma correção pelo ARIMA (0,1,0) para corrigir a diferença entre vazão prevista e observada no início das previsões meteorológicas, feita através de um deslocamento absoluto ou relativo.

Os autores (Gerlinger e Demuth, 2011) utilizaram RMSE (erro médio quadrático) para medir o desvio médio e o THSC que reflete o acerto ou erro para enchentes quando a vazão ultrapassa certo limite pré-estabelecido.

Wu *et al.* (2011) apresentaram um método para obter um *ensemble* de precipitação prevista utilizando a previsão única de modelos numéricos meteorológicos. O método se baseia na utilização da distribuição de probabilidade acumulada bivariada da precipitação observada e da precipitação prevista (meta-gaussiana). Conclusões dos autores: o método proposto é bem sucedido, entretanto sua qualidade varia com a época do ano e a magnitude da precipitação.

Não é bem sucedido quando a previsão for de não ocorrência de chuva e a chuva tiver ocorrido. Necessita de vários anos de dados históricos para calibração, o que nem sempre é disponível. O método proposto é melhor porque reduz a média “CRPS” (índice de desempenho de *ensembles*).

Meller (2012) avaliou o benefício da previsão hidrológica por *ensemble* na previsão de cheias. A bacia hidrográfica estudada foi a do rio Paraopeba (afluente ao rio São Francisco) de área de drenagem aproximada de 12.000 km². Ele utilizou previsões meteorológicas com conjunto (*Ensemble*) que foi aplicado ao modelo hidrológico conceitual MGB-IPH para três períodos chuvosos entre 2008 e 2011 com atualização de estado (assimilação de dados) para correção do valor inicial dos parâmetros hidrológicos. Para efeito de comparação uma previsão determinística também foi realizada. As previsões de cheia por conjunto foram avaliadas de maneira determinística através da análise da média dos membros que compõem o *ensemble* e de maneira probabilística através de parâmetros estatísticos de desempenho apropriados para isso. Foram analisados eventos dicótomos (0 = não aconteceu cheia, ou 1= aconteceu cheia) para cheias acima de certo limite de vazão previamente especificado. *“Para eventos dicótomos as previsões por conjunto mostraram significativa superioridade em relação à previsão determinística e mesmo a média do conjunto, sendo possível obter, na maior parte dos casos analisados, uma indicação da ocorrência do evento de cheia com uma maior antecendência”* (Meller, 2012). Ele mostrou também que, em média, uma diminuição aleatória do número de membros do conjunto diminui o desempenho das previsões. Por último ele mostrou que a utilização da estimativa de precipitação por satélite ao invés de uma rede telemétrica de pluviômetros diminui o desempenho das previsões.

Na análise determinística Meller utilizou: Coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1970 *apud* Gottschalk e Motovilov, 2000); Coeficiente de Persistência-CP (Kitanidis e Bras, 1980 *apud* Meller); Coeficiente de Correlação-*r*; Erro médio-EM; Erro médio quadrático-EMQ e Diagrama de Dispersão-DD. Para eventos dicótomos foi utilizado: taxa de acerto (h), probabilidade de detecção (POD), Probabilidade de falsa detecção (PODF), taxa de alarme falso (FAR) e o BIAS.

Na análise probabilística Meller utilizou: *Brier Score* (Wilks, 2006 *apud* Meller, 2012; Stephenson *et al.*, 2008 *apud* Meller, 2012) e o *Brier Skill Score* (BSS), Diagrama ROC (*Relative Operating Characteristic* ou ainda *Receiver Operating*

Characteristic) que mede a capacidade de um sistema de previsão em discriminar entre eventos ocorridos ou não (Wilks, 1996 *apud* Meller, 2012; Brown *et al.* 2010 *apud* Meller, 2012) e o Spread-Bias Diagram (SBD) também conhecido como *Cumulative Talagrand Diagram* (Philpot *et al.* 2012 *apud* Meller, 2012) ou ainda *Cumulative Rank Histogram* (BROWN *et al.* 2010).

Boucher *et al.* (2012) utilizaram previsões hidrológicas por conjunto em uma ferramenta estocástica de tomada de decisão na operação de uma usina hidroelétrica durante eventos de cheias. A avaliação do desempenho das previsões foi feita então em cima de parâmetros finais de utilização que são: energia gerada, volume armazenado no reservatório e vazão vertida (inundações). Eles mostraram que as previsões por “*ensemble*” apresentam excelentes resultados na gestão e operação de reservatórios (geração e prevenção de cheias). O estudo de caso foi o rio Gatineau na província de Quebec (Canada) com área de drenagem total de 23785 km² que possui 3 usinas hidroelétricas. O modelo hidrológico utilizado foi o HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1995) de base física e distribuído, alimentado com previsões meteorológicas *ensemble* e uma determinística com horizonte de 10 dias a cada 24 horas. O modelo de otimização utilizado, SOHO (Krau, 2005), é uma programação estocástica linear. A Figura 6 transcrita de Boucher *et al.* (2012) apresentam os resultados em termos dos coeficientes CRPS (para *ensemble*) e MAE (para determinístico). Estes coeficientes (CRPS-*Continuous Ranked Probability Score*, MAE-*Mean absolute error*) são similares e comparam as previsões hidrológicas com as vazões observadas. Quanto mais próximas de zero melhor, e pode-se ver na figura que para a bacia estudada a partir do 3º dia as previsões por conjunto (na figura: Raw, BM, Fortin *et al.*) são melhores do que a previsão determinística (na figura: Det). Estas diferenças não foram notadas nas variáveis operacionais (energia gerada e nível do reservatório). Os autores apontam vários motivos para isso entre eles que o SOHO não foi criado para ser utilizado com previsão por conjunto. Eles sugerem mais pesquisas envolvendo a avaliação da influência da previsão *ensemble* nas variáveis finais (após a otimização da operação do reservatório). As previsões hidrológicas por *ensemble* foram pós-processadas com o intuito de melhorá-las com o método do melhor membro (BM) sugerido por Roulston e Smith (2003) e uma variação desta sugerido por Fortin *et al.* (2006). Estes métodos utilizam uma função de probabilidade Kernel (Normal) onde se pode, inclusive, atribuir probabilidade diferente para os membros do

ensemble. Entretanto o método necessita uma grande quantidade de dados históricos para calibrar o que dificulta sua utilização.

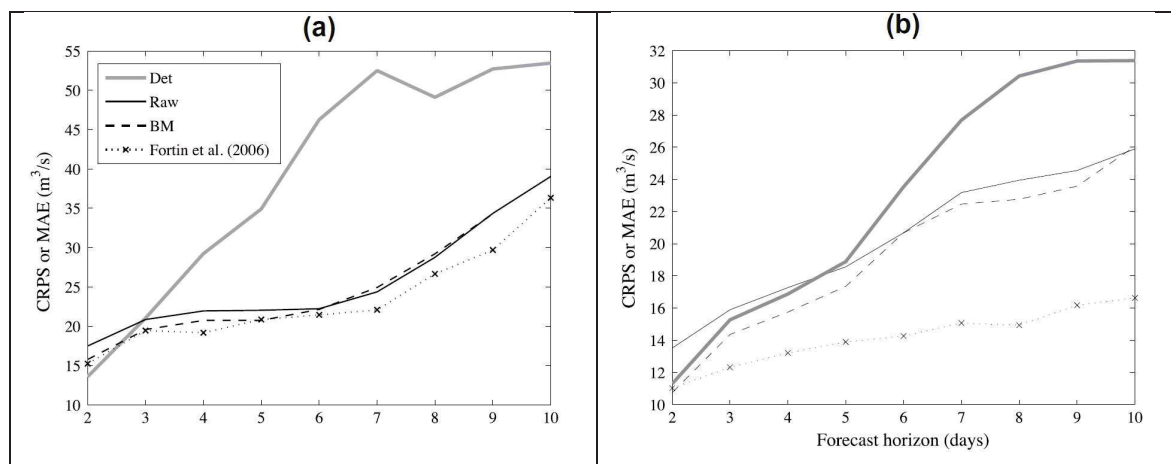


Figura 6 – Comparação das performances de previsões determinísticas e por *ensemble* para duas previsões (a) e (b).

Fonte: Boucher et al. (2012)

2.4 ATUALIZAÇÃO DE ESTADO INICIAL DA PREVISÃO DE VAZÃO

A vazão estimada pelo modelo hidrológico pode não ser igual ao valor observado no tempo inicial da previsão devido a vários fatores como erros nas variáveis de entrada, erros no valor inicial de variáveis de estado do modelo ou erros de calibração. Esta desigualdade entre vazões se propaga do instante inicial para os demais tempos de previsão. A técnica de atualização de estados com o objetivo de que a vazão simulada pelo modelo iguale a vazão observada no instante inicial é chamada de assimilação de dados. A correção pode ser feita nos dados de entrada, nas variáveis de estado (volume dos reservatórios conceituais) ou nos parâmetros do modelo chuva-vazão.

Um dos atualizadores de estado usualmente utilizados é o filtro de Kalman apresentado inicialmente em Kalman (1960). Com o tempo esta técnica foi aprimorada por outros autores como em Gelb (1974) e Welch e Bishop (2002). A partir de uma estimativa inicial do estado o filtro de Kalman estima o estado real do sistema. Por exemplo, num sistema de previsão de vazões o modelo do sistema realiza a previsão a priori da vazão no tempo $t=1$ (primeiro instante após a data da previsão) e através de uma medição de uma grandeza associada ao sistema neste instante $t=1$ o filtro de Kalman atualiza a previsão de vazões para este instante (previsão a posteriori). Gomes e Mine (1998) concluíram que o filtro de Kalman é

útil na construção de modelos hidrológicos com correção e atualização dos parâmetros em tempo real.

Para se utilizar o filtro de Kalman o modelo do sistema tem que ser formulado de maneira apropriada até porque o filtro de Kalman foi formulado inicialmente para sistemas lineares. O método utiliza a matriz de covariância dos erros do estado e uma abordagem Bayesiana considerando conhecidas as distribuições de probabilidade do estado e das medições realizadas no protótipo e a distribuição condicional de probabilidades do estado dadas as medições. O método busca a estimativa da mínima variância para o estado atualizado do sistema que, para sistemas lineares, é o valor esperado do estado, condicionado às medições.

Além do filtro de Kalman os modelos autoregressivos (AR, ARMA, ARIMA), redes neurais artificiais e lógica difusa, podem ser utilizados como modelos de atualização de parâmetros de saída de um sistema (Meller, 2012). Estes modelos utilizam modelos ajustados à series de erros de previsão para prever os erros. Exemplos da aplicação são: AR (Xiong e O'Connor, 2002 apud Meller, 2012), ARIMA (Berthel *et al.*, 2009 apud Meller) redes neurais (Abede e Price, 2003 apud Meller 2012), lógica difusa (Yu e Chen, 2005 apud Meller, 2012) e filtro de Kalman (Srikanthan et al., 2007 apud Meller 2012).

3 MÉTODO PROPOSTO

A precipitação é uma das variáveis do ciclo hidrológico cuja previsão é sujeita a incertezas nos valores previstos. Por consequência, a previsão de vazões também possui essas incertezas. Portanto, o conceito de uma variável difusa é aplicável à vazão prevista ou a precipitação prevista.

Um *ensemble* de previsão de vazões, obtido por um *ensemble* pluviométrico, permite ao operador da barragem ter uma noção da variabilidade das possíveis vazões futuras. Entretanto na tomada de decisão o operador tem geralmente que considerar a média dos *ensembles*.

O método sugerido nesta tese tem como objetivo obter um hidrograma previsto que seja melhor que o hidrograma médio dos *ensembles*. Para isso os hidrogramas previstos do *ensemble* são *fuzificados* através de funções de pertinência.

Através das vazões previstas *fuzificadas*, do grau de pertinência da vazão observada e de regras difusas se obtém a vazão prevista para tempo seguinte e em consequência o hidrograma previsto pelo método proposto. A Figura 10 apresenta um esquema do método proposto.

Para avaliar o método proposto, o hidrograma previsto é comparado com as vazões observadas. As vazões obtidas pela média do *ensemble* também são comparadas com as vazões observadas. Uma alternativa também testada foi aplicar a teoria do método às precipitações e obtenção das vazões, através de modelo chuva-vazão.

Na *fuzificação* das vazões (ou precipitações) se utilizou o *ensemble* previsto, não utilizando os termos linguísticos tradicionais (por exemplo: muito baixo, baixo alto) o que é uma maneira inédita de utilização da lógica difusa na previsão de vazão.

3.1 FUZIFICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS PREVISTOS

No método proposto o valor da vazão prevista não é discretizado em termos linguísticos como, por exemplo, vazão alta, média ou baixa. Ao invés de se ter vazão alta, média ou baixa, no método proposto tem-se vazões pertencentes ao hidrograma *i* (*i*-ésimo hidrograma membro do *ensemble*), isto corresponde a usar

os termos linguísticos “hidrograma 1”, “hidrograma 2”, “hidrograma i ”. Por exemplo, uma vazão observada é considerada “hidrograma 2” se esta vazão está próxima à vazão prevista pelo hidrograma 2 do *ensemble* de hidrogramas. Na prática os hidrogramas do *ensemble* ficam *fuzificados* pelas suas funções de pertinência.

Suponha-se que a previsão de vazões ocorreu às 6 horas. Às 9 horas observa-se que a vazão ocorrida foi de 21 m³/s. Com este valor *crisp* obtém-se os graus de pertinência deste valor aos termos linguísticos (hidrograma 1, hidrograma 2,hidrograma i .) através das funções de pertinência previamente definidas. A Figura 7 apresenta um esquema da *fuzificação* das vazões aos termos linguísticos “hidrograma 1”, “hidrograma 2”, até o “hidrograma n ” ($n = 8$ na figura, n = número de hidrogramas do *ensemble* hidrológico no método proposto), utilizando função de pertinência triangular. Na figura 7 os termos linguísticos “hidrograma 1” é representado pela função de pertinência H1; VP2 e VP7 são as vazões previstas para as 9 horas pelo 2º hidrograma e pelo 7º hidrograma respectivamente.

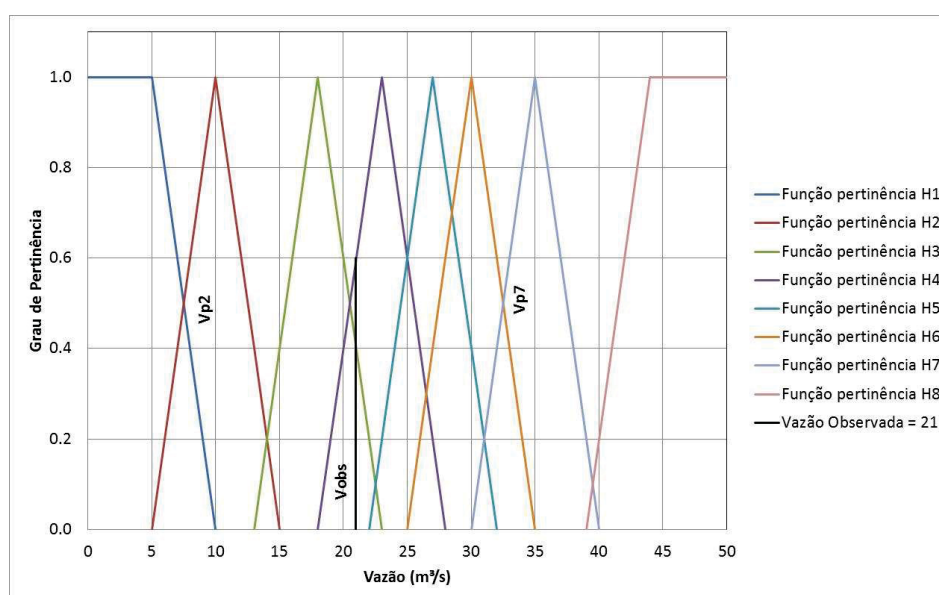


Figura 7 - Vazões e seus Termos Linguísticos

Foram testadas as seguintes funções de pertinência da vazão observada ao hidrograma previsto i : função triangular, exponencial e Gaussiana. Estas funções foram escolhidas devido à sua fácil aplicação computacional. As equações são as seguintes:

Pertinência exponencial:

$$k_i = \frac{L}{(t^{ap_i})} \quad , \quad (3.1)$$

$$\mu_i(V_{obs}) = e^{k_i(V_{obs}-V_{pi})}, \quad \text{Se } V_{obs} < V_{pi} \quad , \quad (3.2)$$

$$\mu_i(V_{obs}) = e^{k_i(V_{pi}-V_{obs})}, \quad \text{Se } V_{obs} > V_{pi} \quad , \quad (3.3)$$

Pertinência triangular:

$$k_i = Lt^a p_i^b, \quad (3.4)$$

$$\mu_i(V_{obs}) = 0,0 \quad \text{se} \quad V_{obs} < V_{pi} - k_i \quad (3.5)$$

$$\mu_i(V_{obs}) = (V_{obs} - V_{pi} + k_i)/k_i \quad \text{se} \quad V_{pi} - k_i < V_{obs} < V_{pi} \quad (3.6)$$

$$\mu_i(V_{obs}) = (-V_{obs} + V_{pi} + k_i)/k_i \quad \text{se} \quad V_{pi} < V_{obs} < V_{pi} + k_i \quad (3.7)$$

$$\mu_i(V_{obs}) = 0,0 \quad \text{se} \quad V_{obs} > V_{pi} + k_i \quad (3.8)$$

Pertinência gaussiana:

$$k_i = Lt^a p_i^b, \quad (3.9)$$

$$\mu_i(V_{obs}) = \frac{1}{(k_i\sqrt{2\pi})} e^{-(V_{obs}-V_{pi})^2/(2k_i^2)}, \quad (3.10)$$

Onde:

L, a, b são constantes (parâmetros a serem estimados).

t é tempo desde a última previsão meteorológica.

p_i é a probabilidade de ocorrer o hidrograma previsto i .

i varia de 1 até o número de previsões meteorológicas (número de hidrogramas previstos do *ensemble*).

V_{obs} é a vazão observada no tempo $t+1$.

V_{pi} é a vazão prevista no tempo $t+1$ para o i -ésimo hidrograma do *ensemble*.

μ_i é a função de pertinência ao i -ésimo hidrograma do *ensemble*.

Nestas funções o grau de pertinência decai à medida que se afasta do valor da vazão prevista pelo hidrograma i tendendo a zero para distâncias muito grandes.

Quanto maior o tempo t menor o parâmetro k e, com isso, maior o grau de pertinência para o mesmo “erro de previsão” (distância do valor observado para o previsto). Isto significa que quanto mais afastado se está do instante da previsão meteorológica, mais imprecisas são as previsões e, portanto, mais abrangente é a função de pertinência e erros maiores podem ser admitidos nestas previsões.

A tendência para as probabilidades é análoga. Quanto maior a probabilidade p de um hidrograma i , mais abrangente é sua função de pertinência num mesmo tempo t . Isto significa que hidrogramas previstos com maior probabilidade de

ocorrência admitem maiores erros para que o valor observado pertença ao conjunto difuso do hidrograma i .

Os parâmetros L , a , b das funções de pertinência foram obtidos por ferramenta matemática de otimização. A obtenção destes parâmetros permite obter as funções de pertinência definidas para todos os hidrogramas do *ensemble* e para todos os tempos t .

3.2 INFERÊNCIA DIFUSA E OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA FINAL

Considerando t_0 o tempo quando ocorreu a previsão de vazões e sendo t um tempo $t > t_0$, obtém-se o grau de pertinência da vazão observada no tempo t em todos os hidrogramas do *ensemble* através das equações de pertinência (3.1) a (3.10).

Aplica-se a inferência difusa pelo método Sugeno através de regras difusas para obter a vazão prevista para o tempo $t+j$. São definidas i regras difusas sendo i o número de membros do ensemble:

- Se V_{obs} no tempo t pertence ao hidrograma i então a vazão prevista para o tempo $t+j$ é igual a $V_{pi^{t+j}}$ Para j de $t+1$ a h (horizonte de previsão). Sendo $V_{pi^{t+j}}$ a vazão prevista pelo i -ésimo membro do *ensemble* para os tempos $t+j$.

Existindo portando n regras difusas iguais a esta com i de 1 a n (número de membros do ensemble). O número de regras difusas (n) depende do *ensemble* pluviométrico utilizado: se for utilizado o CPTEC o (n) é igual a 14, para o GEFS o (n) é igual a 20 e se for o ECMWF o (n) é 50.

A Figura 8 apresenta as três primeiras regras difusas. Nesta figura V_{obs}^t é a vazão observada (*crisp*) para algum tempo t após o instante de previsão (pode ser 3 horas, por exemplo), $H1$, $H2$, $H3$ são as funções de pertinência triangulares representativas dos termos linguísticos hidrograma1, hidrograma2 e hidrograma3 respectivamente. Uma vazão observada é “hidrograma2” (termo linguístico) se está “próxima” o suficiente da previsão de vazão do hidrograma2 (2º hidrograma do ensemble) para este instante de tempo t (por exemplo, 3 horas após o instante da previsão). Ainda nesta figura V_{PH1}^{t+j} é a vazão prevista pelo hidrograma1 para um tempo maior que a do instante de aplicação da regra difusa (por exemplo maior que 3 horas), ou seja $t+j$. O mesmo vale para os outros termos da figura com terminação

1 ou 3 (valendo para os hidrograma previsto 1 e 3 do ensemble). Demais regras difusas são similares a estas.

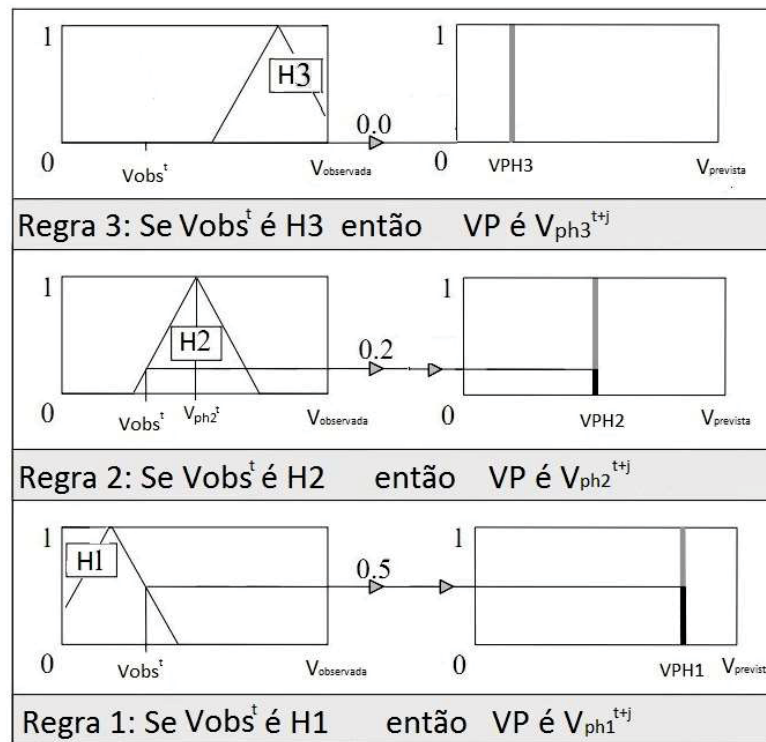


Figura 8 – As três primeiras regras difusas e a inferência utilizando o método de Sugeno.

Adaptada de Hamed (2016)

A agregação dos consequentes das n regras da lógica difusa e a *defuzificação*, no método Sugeno, acaba sendo uma média ponderada das vazões previstas, $V_{phi^{t+j}}$, cujos pesos são os graus de pertinência $\mu_i(V_{obs})$ para o tempo t . Portanto a previsão (crisp) para o tempo $t+j$ será:

$$VF_{p,t+j} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i(V_{obs,t}) V_{pi,t+j})}{\mu_i(V_{obs,t})} \quad \text{para } j = 1 \text{ a } h - t \quad (3.11)$$

Onde:

$VF_{p,t+j}$ é a vazão prevista por *fuzificação* para o tempo $t+j$

$V_{pi,t+j}$ é a vazão prevista pelo i -ésimo *ensemble* hidrológico para o tempo $t+j$.

$V_{obs,t}$ é a vazão observada no tempo t .

μ_i é a função de pertinência ao i -ésimo hidrograma do *ensemble*.

Para cada novo tempo (t) novo hidrograma previsto é calculado com base na nova observação da vazão. Desta maneira a cada t um novo hidrograma já está disponível para entrar nos modelos de otimização da operação do reservatório com

a finalidade de minimizar as cheias a jusante.

A Figura 9 apresenta um exemplo dos hidrogramas previstos pelo *ensemble* (em cores azul, vermelho e cinza), pela média dos *ensembles* (preto) e pelo método proposto (linha pontilhada preta). Por simplificação é apresentado na figura apenas 3 hidrogramas do *ensemble*, mais na realidade o *ensemble* possui 14, 20 ou 50 hidrogramas conforme o instituto meteorológico utilizado. No instante da previsão pluviométrica tem-se apenas os *ensembles* e sua média, gráfico (a) da figura. Duas horas após a previsão pluviométrica se tem também a previsão pelo método (linha pontilhada no gráfico (b) da figura). Quatro horas após a previsão pluviométrica se tem outra previsão (atualizada) pelo método proposto e assim por diante. Em todos os gráficos da Figura 9 o tempo do eixo x inicia-se no instante da previsão pluviométrica com *ensemble*. O intervalo de duas horas utilizado neste exemplo pode ser alterado para uma hora ou outro intervalo como por exemplo três horas. A hipótese a ser testada nesta tese é que a previsão obtida pelo método é melhor que a média dos *ensembles*. Para isso se utilizou os testes de hipóteses com distribuições *T student* e Normal.

A Figura 10 apresenta um esquema do método proposto mostrando os dados de entrada necessários (conjunto de hidrogramas previstos, vazão observada, funções de pertinência definidos) e as etapas do processo. Este esquema mostra que com os parâmetros L , a , b e as previsões por *ensemble* hidrológico definidos é realizada a *fuzificação* das vazões, ou seja, são definidas as funções de pertinência para todos os hidrogramas do *ensemble*. Com a vazão observada algumas horas após o instante da previsão pluviométrica (instante $T = t + dt$, sendo t o instante da previsão pluviométrica e dt um intervalo em horas pré-definido até a próxima aplicação do método proposto) realiza-se a inferência difusa (aplicação das regras difusas) e em seguida a agregação e *defuzificação* (equações 3.11 e 3.14) obtendo o hidrograma previsto do instante $t + dt$ até o horizonte de previsão. No instante $T = t + 2dt$ realiza-se a inferência difusa novamente e obtêm-se novo hidrograma. Repete-se o processo a partir da inferência difusa e até que $T = t + idt$ seja 12 horas após a última previsão pluviométrica, pois neste caso já se tem uma nova previsão por *ensemble* hidrológico (novo *ensemble* pluviométrico disponível) e reinicia todo o processo desde o início para a nova data. Alternativamente pode-se continuar repetindo a inferência para $T > t + 12$ horas, até que T seja igual ao horizonte de previsão (neste caso utilizando uma previsão por *ensemble* já desatualizada).

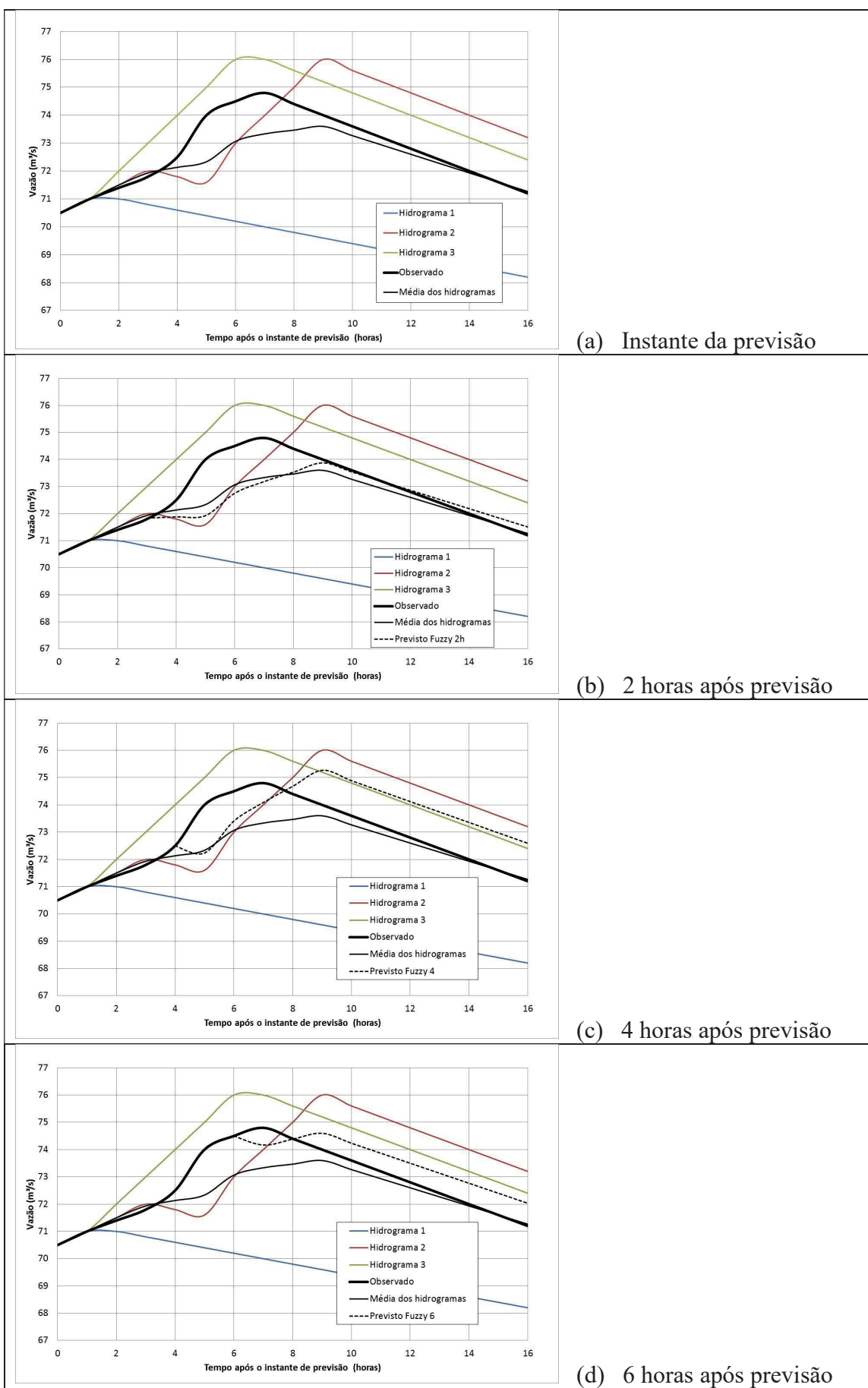


Figura 9 - Hidrogramas nos vários instantes após a previsão pluviométrica

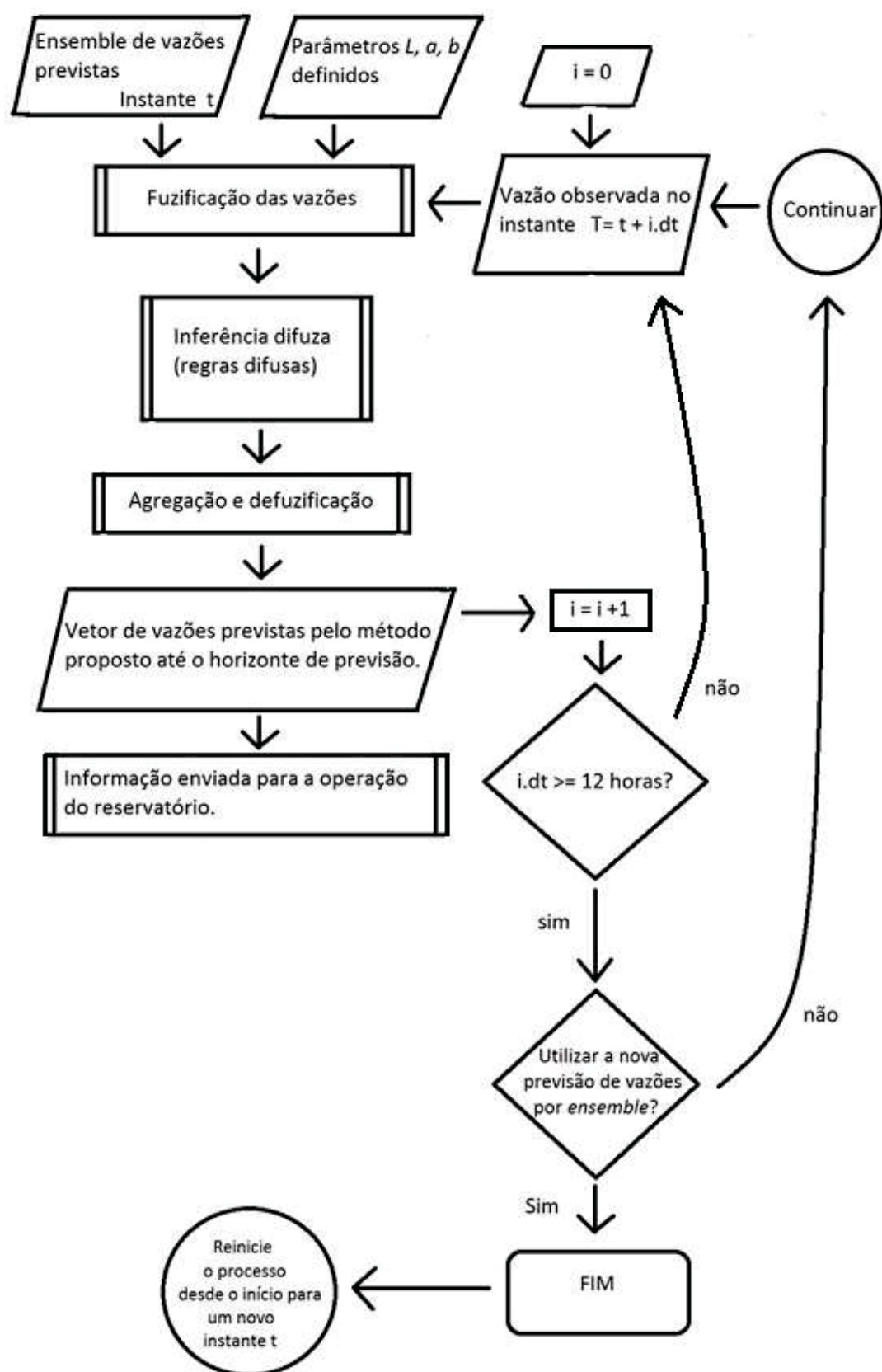


Figura 10 – Esquema do método proposto

3.3 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS VAZÕES

Os parâmetros L , a , b das funções de pertinência são obtidos de tal maneira a obter o melhor coeficiente de performance Nash-Sutcliffe do método aplicado na série histórica de vazões observadas e vazões previsões por *ensemble*. Pode-se encarar esta obtenção dos parâmetros como uma otimização onde a função objetivo é o próprio índice de Nash-Sutcliffe (NS):

$$NS = 1 - \frac{\sum(\hat{Q}-Q)^2}{\sum(Q-\bar{Q})^2}, \quad (3.12)$$

Sendo:

- Q é a vazão observada afluente ao reservatório.
- \bar{Q} é a vazão observada média.
- \hat{Q} é a vazão prevista pelo método ($VF_{p,t+j}$) para os tempos $t+1$ até h ($j=1$ a $h-t$) e para os tempos de aplicação do método (h é o horizonte de previsão).

Segundo Machado e Ventorazzi (2003 apud Baltokoski *et al.*, 2010) o coeficiente NS é uma das mais importantes métricas estatísticas para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos. Este coeficiente varia de “– infinito” até 1 (um). Valores maiores que 0,75 são considerados bons.

A obtenção dos parâmetros L , a , b permite obter as funções de pertinência definidos para todos os hidrogramas do *ensemble* e para todos os tempos t .

A Figura 11 apresenta um esquema da obtenção dos parâmetros L , a , b . Neste esquema, que mostra a calibração, primeiramente arbitra-se os parâmetros L , a , b . Com estes parâmetros obtêm-se as funções de pertinência (equações 3.1 a 3.10). As previsões históricas por *ensemble* hidrológico, as vazões históricas e as funções de pertinências são utilizadas pelo método proposto (regras difusas e equação 3.11) para obter todos os hidrogramas previstos para o período de calibração. Estes hidrogramas tem horizonte de previsão igual ao horizonte dos hidrogramas do *ensemble*. No fim do processo obtêm-se um trio de parâmetros ótimos para cada data de previsão do histórico utilizado na calibração. As previsões históricas por *ensemble* sem de 12 em 12 horas. Verificou-se que os parâmetros da função de pertinência definidos por este processo não são sensíveis aos valores iniciais arbitrados.

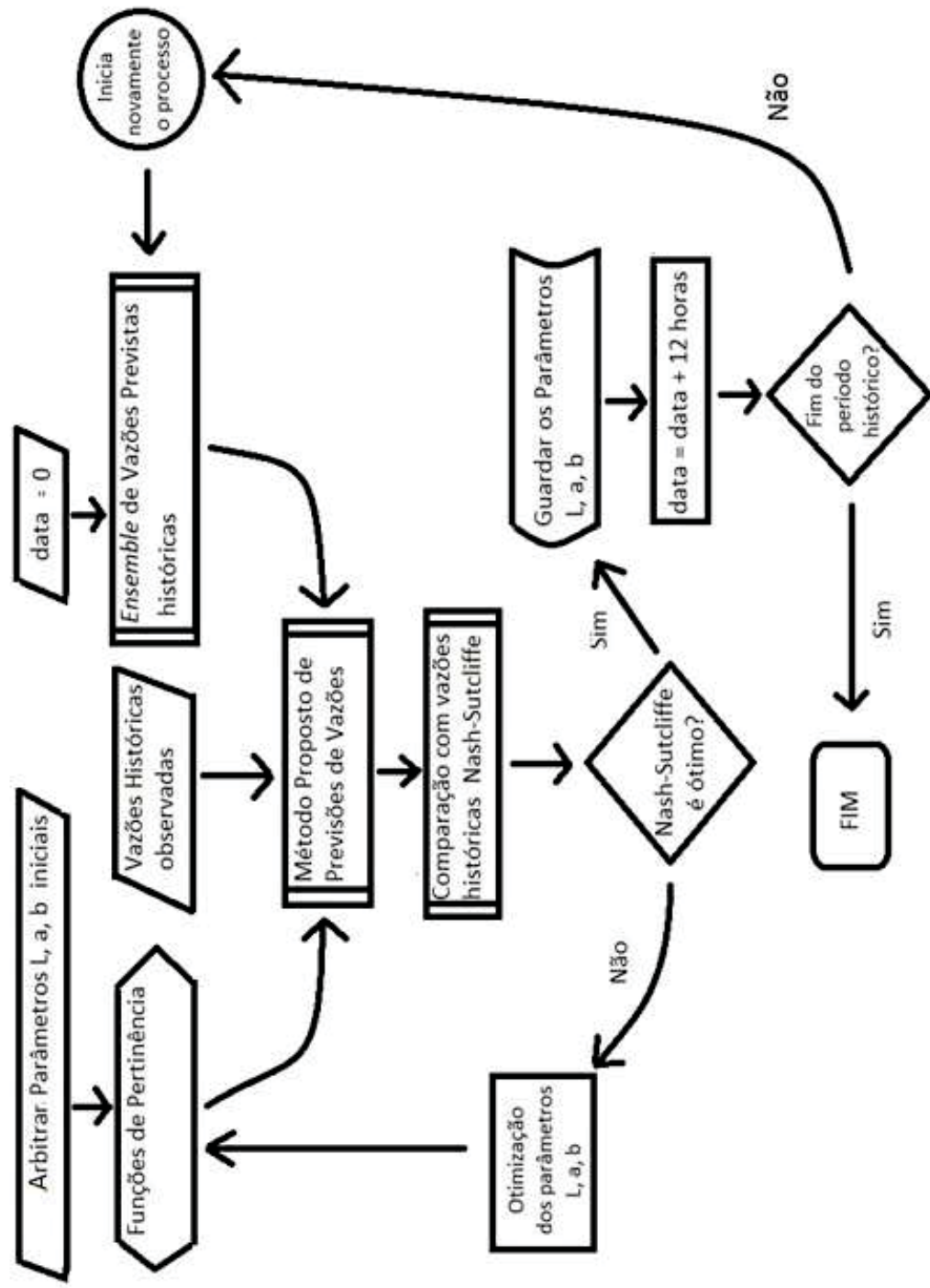


Figura 11 - Esquema de calibração para obtenção dos parâmetros L , a , b .

3.4 FUZIFICAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES ACUMULADAS PREVISTAS

Alternativa do método proposto é a *fuzificação* das precipitações ao invés da *fuzificação* das vazões. Neste caso a variável precipitação prevista não é discretizada em valores linguísticos como é normal numa variável *fuzificada*. Ao invés de se ter precipitação alta, média ou baixa o método sugere que se tenha precipitações pertencentes ao pluviograma i (i -ésimo membro do *ensemble* pluviométrico). Para isso é necessária uma função de pertinência para cada membro do conjunto de precipitações previstas. Na prática os membros do *ensemble* pluviométrico ficam *fuzificados* pelas suas funções de pertinência.

O excesso de dias sem chuvas (precipitação igual à zero) pode ocasionar vários problemas no método proposto sendo necessário várias alterações na formulação. Para evitar este tipo de problema utilizou-se as precipitações acumuladas (observadas e previstas) desde o instante de previsão e não as precipitações acumuladas em cada intervalo. As previsões de precipitação obtidas no site da TIGGE (*Thorpex Interactive Grand Global Ensemble*) foram transformadas em precipitações previstas acumuladas para obter os pluviogramas previstos.

Foram testadas algumas funções de pertinência da precipitação acumulada observada à precipitação acumulada prevista: função triangular, exponencial e Gaussiana. As equações são as já apresentadas (3.1) a (3.10) trocando vazão por precipitação acumulada.

3.5 INFERÊNCIA DIFUSA E OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA FINAL NO CASO DE FUZIFICAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES

Considerando t_0 o tempo quando ocorreu a previsão de precipitações e sendo t um tempo $t > t_0$, obtém-se o grau de pertinência da precipitação acumulada observada no tempo t em todos os membros do *ensemble* pluviométrico acumulado através das equações de pertinência (3.1) a (3.10) adaptadas para pluviometria (troca de *Vazão* por *Precipitação Acumulada*, como já comentado).

Aplica-se a inferência difusa pelo método Sugeno através de regras difusas para obter a precipitação acumulada prevista para o tempo $t+j$. São definidas i regras difusas sendo i o número de membros do *ensemble*:

- Se P_{obs} (precipitação acumulada observada) no tempo t pertence ao i -ésimo membro do *ensemble* pluviométrico acumulado então a precipitação acumulada prevista para o tempo $t+j$ é igual a $P_{pi^{t+j}}$ (precipitação acumulada prevista pelo membro i para o tempo $t+j$) para j de $t+1$ a h (horizonte de previsão). Sendo $P_{pi^{t+j}}$ a precipitação acumulada prevista pelo i -ésimo membro do *ensemble* para os tempos $t+j$.

Existindo portando n regras difusas iguais a esta com i de 1 a n (número de membros do *ensemble*).

A agregação das n regras difusas e a *defuzificação*, no método Sugeno, acaba sendo uma média ponderada das precipitações acumuladas previstas, $P_{pi^{t+j}}$, cujos pesos são os graus de pertinência $\mu_i(P_{obs})$ para o tempo t . Portanto a previsão para o tempo $t+j$ será:

$$PF_{p,t+j} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i(P_{obs,t}) P_{pi^{t+j}})}{\mu_i(P_{obs,t})} \quad \text{para } j = 1 \text{ a } h - t \quad (3.14)$$

Onde:

$PF_{p,t+j}$ é a precipitação acumulada prevista por *fuzificação* para o tempo $t+j$;

$P_{obs,t}$ é a precipitação acumulada observada no tempo t .

n é o número de membros do *ensemble* pluviométrico.

Para cada novo tempo (t) uma nova série de precipitação acumulada prevista é calculada com base na nova observação da precipitação. Desta maneira a cada t aplica-se o modelo chuva-vazão e um novo hidrograma previsto estará disponível para entrar nos modelos de otimização da operação do reservatório com a finalidade de minimizar as cheias a jusante. A série de precipitação acumulada prevista é transformada em não acumulada para utilização no modelo chuva-vazão.

3.6 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES

Os parâmetros L , a , b das funções de pertinência são obtidos de tal maneira a obter o melhor índice de performance Nash-Sutcliffe do método aplicado nas séries históricas de precipitações acumuladas observadas e precipitações acumuladas previsões por *ensemble*. Pode-se encarar esta obtenção dos

parâmetros como uma otimização onde a função objetivo é o próprio índice de Nash-Sutcliffe (NS):

$$NS = 1 - \frac{\sum(\hat{P}-P)^2}{\sum(P-\bar{P})^2} \quad (3.15)$$

Sendo:

- P : precipitação acumulada observada na bacia a montante do reservatório.
- \bar{P} : precipitação acumulada observada média.
- \hat{P} = precipitação acumulada prevista pelo método ($PF_{PT^{t+j}}$) para os tempos $t+1$ até h ($j=1$ a $h-t$) e para os tempos de aplicação do método T de t até $h-1$ (h é o horizonte de previsão).

A obtenção dos parâmetros L , a , b permite obter as funções de pertinência definidos para todos os hidrogramas do *ensemble* e para todos os tempos t .

3.7 CLASSIFICAÇÃO DE ENSEMBLES UTILIZANDO ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A análise de componentes principais, ACP, foi proposta por Karls Pearson em 1901 e consiste em um procedimento matemático para transformar um conjunto de observações de variáveis dependentes (vetores não ortogonais) em um conjunto de variáveis independentes (vetores ortogonais) denominados de componentes principais. Supõem-se que os dados originais são normalmente distribuídos para garantir a independência dos componentes principais. Outra restrição é que dados de *outliers* devem ser retirados da amostra pois os resultados são sensíveis a estes valores. A ACP é utilizada normalmente para diminuir o número de variáveis, em uma análise com grande quantidade de variáveis, sem perda significativa de informações. Outra aplicação da ACP é no agrupamento de dados em grupos semelhantes como feito em Saboia *et al.* (2013).

O método proposto de fuzificação de vazões ou precipitações na fase de calibração obtêm um trio de parâmetros L , a , b “otimizado” para cada data de previsão do histórico de previsões. Na utilização *online* do método é necessária a obtenção de um único trio de parâmetros. Deve-se responder à pergunta: qual trio de parâmetros utilizar?

A ideia proposta é agrupar as diversas previsões pluviométricas em conjuntos semelhantes onde se usaria o mesmo trio de parâmetros. Para isso,

previsões por membros do *ensemble* pluviométrico semelhantes foram separadas em grupos utilizando análise de componentes principais da seguinte forma:

- Cada previsão por conjunto é composta por m membros com n observações cada. Assim, cada membro é uma série temporal com n valores.
- Cada valor da série temporal corresponde a um horizonte de previsão. Por exemplo, se a previsão é composta de acumulados de precipitação prevista a cada 6 horas, o primeiro termo da série é o valor previsto para o horizonte de previsão de 6 horas, o segundo para o horizonte de 12 horas, o terceiro para o horizonte de 18 horas e assim sucessivamente.
- Se o conjunto de previsão possui m membros, então para cada horizonte de previsão existem m valores.
- Foi calculado o desvio padrão de cada horizonte de previsão, utilizando a série de m valores de cada horizonte. Assim obteve-se uma série de desvios padrão de tamanho n , pois este é o número de horizontes de previsão. Esta série representaria uma característica de uma específica previsão por *ensemble*.
- O mesmo procedimento foi aplicado a todas as previsões por conjunto, gerando assim p séries de desvios padrão, onde p é o período histórico utilizado (número de previsões utilizadas)
- Estas p séries temporais geradas foram submetidas à Análise de Componentes Principais (ACP), Johnson e Wichern (1998), para identificar séries semelhantes entre si.
- Como produto da ACP, são obtidas p novas séries que são os componentes principais do conjunto original. Foi calculado então o coeficiente de correlação entre estas novas séries e as séries anteriores, e agrupadas as séries utilizadas como entrada na ACP de acordo com estes coeficientes de correlação, da seguinte forma:
 - Foi calculado o coeficiente de correlação de todas as séries de entrada com todas as séries geradas com a ACP, obtendo uma matriz de correlação.
 - Todas as séries de entrada do ACP que tenham melhor correlação com uma mesma série de saída do ACP ficam agrupadas em um mesmo grupo. Por exemplo: Se as séries de entrada 1, 3, 5, 12 e 15 (1 corresponde a primeira previsão por *ensemble*, 3 a terceira e assim sucessivamente) possuem melhor correlação com a primeira série da

ACP, as previsões 1, 3, 5, 12 e 15 são semelhantes entre si e estão no mesmo grupo;

Para cada agrupamento de previsões semelhantes se utiliza o mesmo trio de parâmetros que será a média dos parâmetros obtidos da otimização utilizando estas previsões pertencentes ao agrupamento.

3.8 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Na utilização do método proposto utilizando a *fuzificação* das precipitações, numa operação “*online*”, a sequência de cálculos é a seguinte:

- a) Obter a nova previsão pluviométrica por *ensemble* dos institutos meteorológicos.
- b) Transformar estas previsões em previsões acumuladas diárias (ou 6 horas)
- c) Calcular a série de desvios padrões das previsões do *ensemble*.
- d) Descobrir a qual grupo esta previsão pertence através da correlação entre a série de desvio padrões da previsão e a dos grupos. A que der melhor correlação é o grupo que ele pertence.
- e) No tempo posterior ao tempo de previsão pluviométrica obtém-se uma precipitação observada (média da bacia hidrográfica) e aplica-se o método proposto com os parâmetros médios do grupo escolhido. No método a função de pertinência a ser adotada é a exponencial (a que melhor se ajustou como será mostrado no item 5).
- f) Através do método proposto obtém-se uma série de previsão única de precipitação acumulada diária (ou de 6 horas). Transforma-se estas precipitações em não acumuladas.
- g) Aplica-se o modelo chuva-vazão com estas chuvas previstas (incluindo também as chuvas estimadas nos instantes anteriores à data da previsão) para obter vazões previstas.
- h) Aplica-se o método proposto das letras e) a g) a cada intervalo de tempo.
- i) Quando for atualizada a previsão pluviométrica por *ensemble* dos institutos de meteorologia inicia-se novamente o processo.
- j) Alternativamente pode-se também continuar a utilização do método com a previsão por *ensemble* pluviométrica antiga paralelamente à nova.

A ACP a ser utilizada no item (d) deve ser calculado para chuvas de 6 horas, caso a aplicação nas funções de pertinência seja a cada 6 horas e um ACP calculado para chuvas de 24 horas se a aplicação da chuva nas funções de pertinência seja a cada 24 horas. No cálculo dos agrupamentos com o método do ACP, as previsões obtidas através de otimização dos parâmetros, na fase de calibração, que resultarem coeficientes de NS abaixo de -0,5 (para ACP de 24 horas) e abaixo de -10 (para ACP de 6 horas) são descartadas para a obtenção da média dos parâmetros. Previsões exageradamente ruins não devem influenciar o valor médio dos parâmetros, por esse motivo ocorreu estes descartes.

O item (e) é melhor detalhado da seguinte maneira: duas horas após a previsão pluviométrica (*ensembles*) calcula-se o tempo de recorrência da chuva observada na bacia hidrográfica através de equação de chuvas intensas (intensidade da chuva x tempo de duração x tempo de recorrência). Com este mesmo tempo de recorrência calcula-se a chuva para um intervalo de tempo de 6 horas (ou 24 horas). Aplica-se o método comparando esta chuva com a chuvas previstas pelos membros do *ensemble* para o próximo intervalo de 6 horas (ou 24 horas). Esta transformação é necessária pois a discretização no tempo das previsões pluviométricas são de 6 em 6 horas.

Caso se utilize a versão no qual ocorre a *fuzificação* das vazões a sequência de cálculos é a seguinte:

- a) Obter a atualização da previsão pluviométrica por *ensemble* dos institutos meteorológicos.
- b) Calcular a previsão de vazões através do *ensemble* pluviométrico obtendo um *ensemble* de hidrogramas, através da aplicação do modelo Chuva-vazão.
- c) Calcular a série de desvios padrões das previsões de vazões do *ensemble* hidrológico.
- d) Descobrir a qual grupo esta previsão pertence através da correlação entre a série de desvio padrões da previsão e a dos grupos. A que der melhor correlação é o grupo que ele pertence.
- e) No tempo posterior ao tempo de previsão pluviométrica obtêm-se uma vazão observada e aplica-se o método proposto com os parâmetros médios do grupo escolhido. No método a função de pertinência a ser adotada é a exponencial (a que melhor se ajustou como será mostrado no item 5).
- f) O método proposto nos dá uma série de previsão única de vazão: um

hidrograma único previsto.

- g) Aplica-se o método proposto das letras e) a g) a cada intervalo de tempo.
- h) Quando chega outra previsão pluviométrica por *ensemble* dos institutos de meteorologia inicia-se novamente o processo.
- i) Alternativamente pode-se também continuar a utilização do método com a previsão por *ensemble* pluviométrica antiga paralelamente à nova.

4 ESTUDO DE CASO

O método proposto foi utilizado em dois locais: UHE Irapé, localizada no rio Jequitinhonha em Minas Gerais e UHE Rosal, localizada no rio Itabapoana (divisa dos estados de Rio de Janeiro e Espírito Santo), ambas pertencentes a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). Foram escolhidos estes dois locais por serem hidrologicamente diferentes em vários sentidos.

Itabapoana é uma bacia de tamanho médio (1784 km²) na face sul da serra da Mantiqueira, portanto uma bacia de cabeceira com tempo de concentração de média magnitude, além disso, o reservatório de Rosal é pequeno.

Jequitinhonha é uma bacia de médio para grande porte (área de 15819 km²) de clima e vegetação mais áridos e com tempo de concentração grande, sendo Irapé um reservatório maior com maior capacidade de retardar uma cheia.

Com estas diferenças é possível verificar qual tipo de bacia hidrográfica é mais adequada para a aplicação do método proposto. A relação da discretização do *ensemble* pluviométrico e tamanho da bacia também é distinta para as duas bacias hidrográficas. A Bacia do Itabapoana é coberta por 1 a 2 *pixels* enquanto que a bacia do rio Jequitinhonha é coberta com vários *pixels* (1 *pixel* = 52 km x 52 km aproximadamente).

Neste capítulo descreve-se o local onde se aplicou o método proposto e as suas características fisiográficas principais: hidrografia, relevo, clima e vegetação. No capítulo 5 é mostrado a aplicação do método nestes locais incluindo todos os modelos utilizados: previsão pluviométrica (item 5.1), modelo chuva-vazão (item 5.2) e finalmente a aplicação do método proposto (item 5.3).

4.1 HIDROGRAFIA DAS BACIAS

A rede hidrográfica de uma bacia pode ser representada pelo coeficiente de compacidade e o tempo de concentração. Estes dois parâmetros são importantes para o diagnóstico do tempo de resposta de uma bacia diante das precipitações.

Comparando o coeficiente de compacidade para a bacia do Jequitinhonha ($K_c=2,82$) e para a bacia do Itabapoana ($K_c=2,00$) verifica-se que Jequitinhonha tem um coeficiente bem maior o que leva a ter um tempo de concentração também maior. O Coeficiente de compacidade é obtido através da equação abaixo:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A_d}} \quad (4.1)$$

Onde P é o perímetro da bacia (km) e A_d é a área de drenagem da bacia (km²). Ambos os valores foram obtidos a partir dos *shapefiles* do contorno das bacias, determinados através do modelo digital do terreno, utilizando a ferramenta ArcMap do ArcGIS. O coeficiente de compacidade é a representação numérica da forma da bacia. Bacia com formato mais próximo de uma circunferência (valores de compacidade próximo a 1) são mais propícias a maiores picos de cheias. O coeficiente é sempre maior que 1. Isso mostra que Itabapoana tem uma maior tendência a cheias.

O tempo de concentração nos eixos das barragens de Irapé e Rosal foi estimado pelas fórmulas apresentadas na Tabela 2 e os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 - Fórmulas para estimativa do tempo de concentração (horas) de uma bacia hidrográfica

Ven Te Chow	$T_c = 0,8773 \left(\frac{L}{\sqrt{i'}} \right)^{0,64}$
CHPW (<i>California Highways and Public Works</i>) $A > 1\text{Km}^2$	$T_c = \left(\frac{0,87L^3}{H} \right)^{0,385}$
Picking	$T_c = 0,0833 \left(\frac{L^2}{i''} \right)^{0,333}$
Temez (1978)	$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{i_{0,25}} \right)^{0,76}$
Dodge	$T_c = 0,36467A^{0,41}i''^{-0,17}$
Giandotti (1953)	$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_1}}$

Onde: L é o comprimento do talveg principal (km);

i é a declividade (%);

i' é a declividade m/km;

i'' é a declividade m/m;

H é a diferença de cota entre as extremidades do curso d'água principal (m);

A é a área de drenagem da bacia hidrográfica (km²);

H_1 é a altura média da bacia (m) acima da cota na exutória;

T_c é o tempo de concentração em horas;

Tabela 3 – Tempo de Concentração em horas

	Rosal	Irapé
Picking	9,93	35,35
Ven Te Chow	8,95	30,29
Califórnia- CHPW	15,50	67,20
Temez	10,55	36,68
Giandotti	33,17	61,05
Dodge	18,19	53,75
Mínimo	8,95	30,29
Média	16,05	47,39
Máximo	33,17	67,20

A variabilidade dos resultados do tempo de concentração nos eixos das barragens de Irapé e Rosal demonstram que as equações utilizadas foram obtidas de bacias hidrográficas e eventos de características distintas entre si e, diferentes, também, das bacias de Itabapoana e Jequitinhonha.

4.2 RELEVO

A Figura 12 apresenta o MDE (modelo digital de elevação do terreno) para a bacia do Itabapoana, obtido de sensor de satélite ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). É possível também visualizar nesta figura o lago formado pela barragem e a cidade a ser protegida (Bom Jesus do Itabapoana).

A Figura 13 apresenta o MDE ASTER para a bacia do Jequitinhonha. É possível também visualizar nesta figura o lago formado pela barragem e as cidades a serem protegidas.

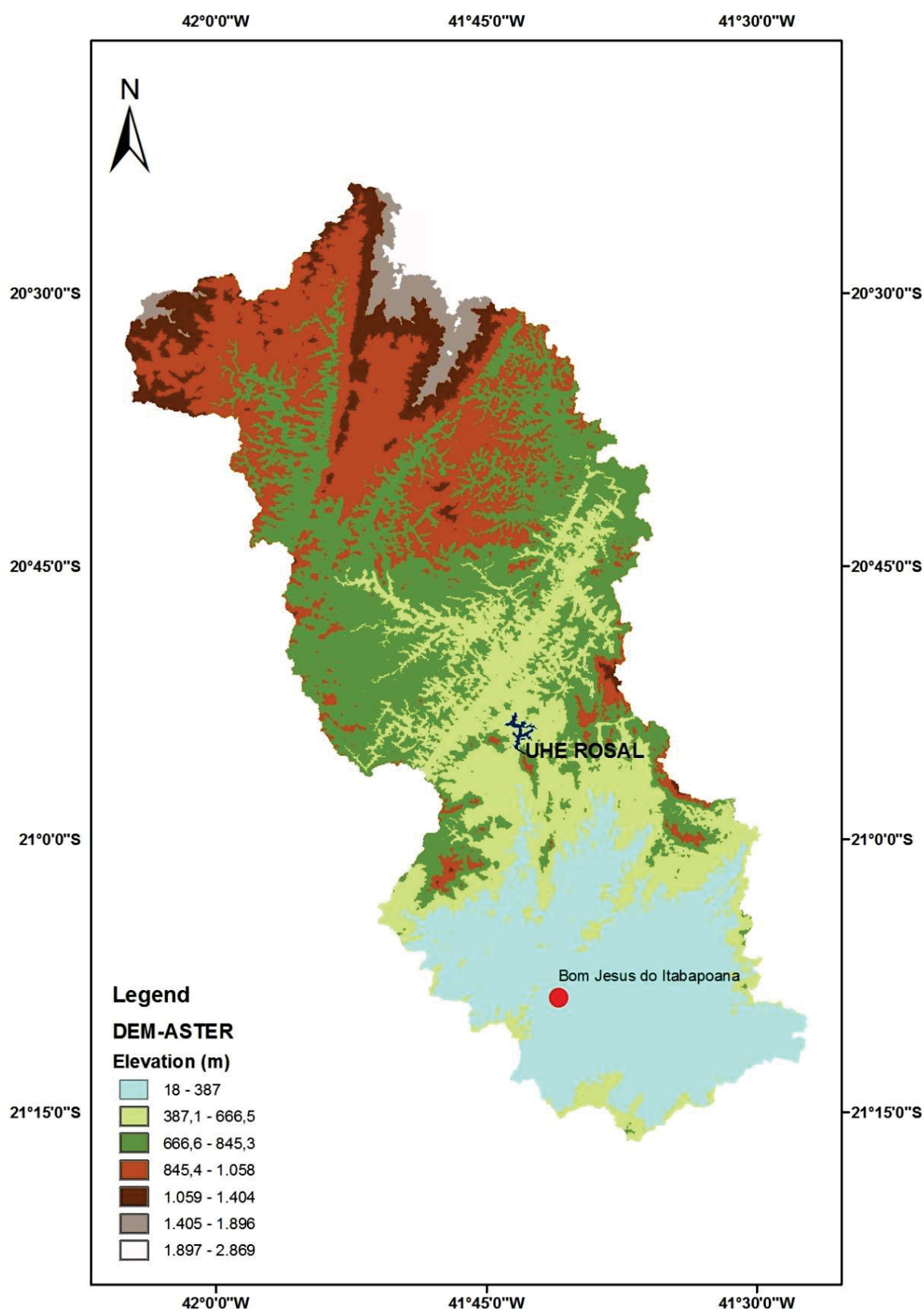
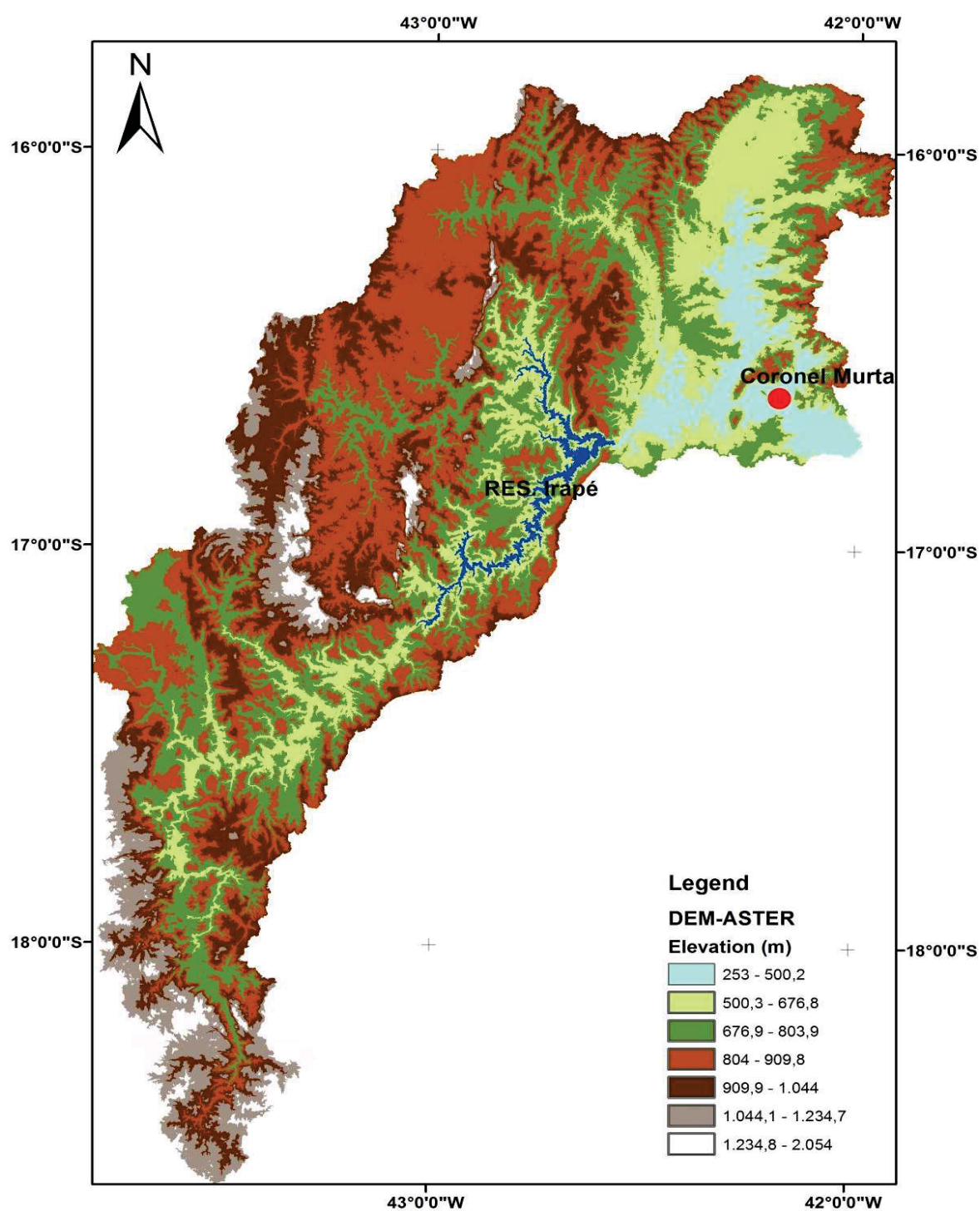


Figura 12 – MDE ASTER - Bacia do rio Itabapoana



4.3 CLIMA

Segundo a classificação climatológica de Köppen, a bacia do Rio Itabapoana pode ser dividida em três tipologias:

- *Aw* (tropical sub-úmido seco);
- *Cwa* (tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes);
- *Cwb* (tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos).

A Figura 14 ilustra as tipologias climáticas dessa região, mostrando também a localização da bacia no estado de Minas Gerais. Na região a montante do reservatório de Rosal o clima predominante é o *cwb*.

A precipitação anual varia de 900 mm a 1.200 mm e a temperatura média anual é de 20°C (18°C no inverno e 24°C no verão). A umidade relativa se mantém em torno de 80% durante todo o ano.

A bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha é composta basicamente por três regimes climáticos conforme a classificação de Köppen são eles:

- *Cwb* (tropical de altitude com chuvas de verão e verões temperados);
- *Cwa* (tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes);
- *Aw* (tropical sub-úmido seco).

A Figura 15 ilustra as tipologias climáticas dessa região, mostrando também a localização da bacia nos Estados de Espírito Santo e Rio de Janeiro. Verifica-se a predominância do Clima *Aw* (que também é conhecido como clima tropical/savana)

A precipitação média anual é da ordem de 808 mm e a temperaturas variam entre 21 a 24 °C. A umidade relativa do ar está inserida na faixa de 60 a 80%.

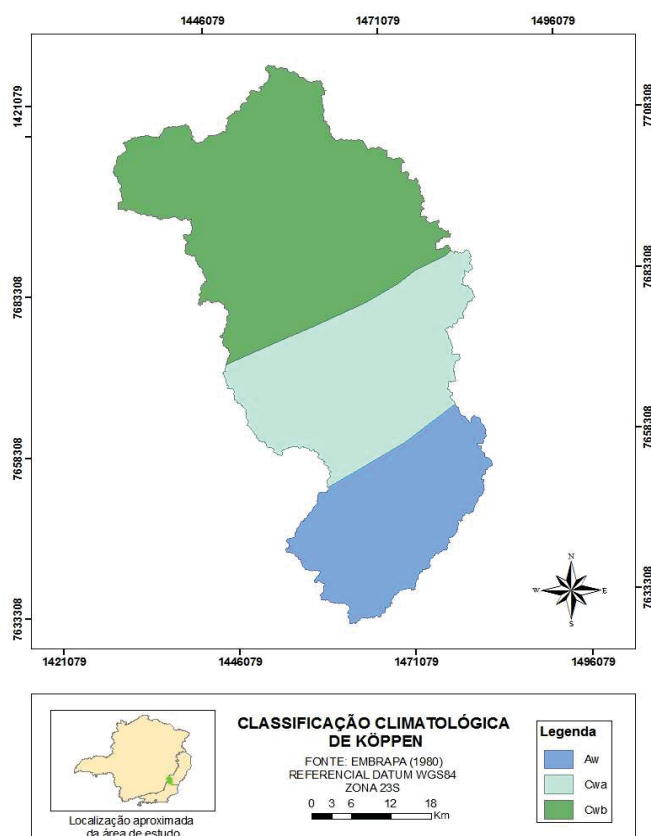


Figura 14 – Classificação climatológica de Köppen – Bacia do Rio Itabapoana

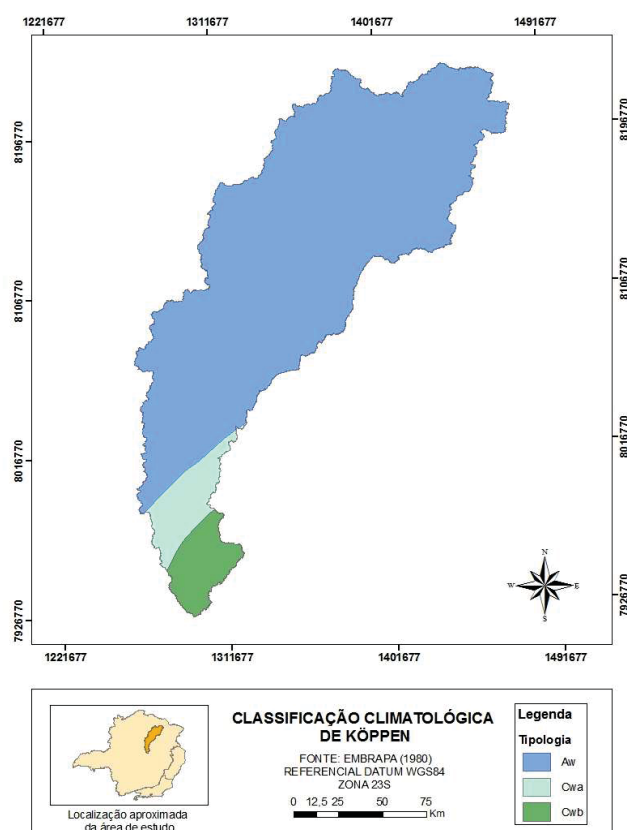


Figura 15 - Classificação Climatológica de Köppen - Bacia do Rio Jequitinhonha

4.4 VEGETAÇÃO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A diferença climática predominante das duas bacias de AW (Jequitinhonha) para Cwb e Cwa (Itabapoana) além de outros fatores impactam na diferença de vegetação e ocupação do solo.

Na bacia do Itabapoana a agricultura é predominante (52,25%) e é realizada em terras anteriormente ocupadas pela mata atlântica no centro e norte (montante) da bacia. Da floresta tropical original sobrou a Floresta Estacional Semi-Decidua e a Floresta Ombrófila Densa, ambas totalizando 24,56% da área total da bacia, e se apresentam fragmentadas e espalhadas em toda a bacia. A Floresta Ombrófila Densa aparece nas regiões montanhosas mais à montante da bacia. A Figura 16 apresenta o mapa da vegetação da bacia de Itabapoana.

Na bacia do Jequitinhonha a Savana é predominante (77,28%) na bacia. Também chamada de cerrado é composta de gramíneas, com árvores esparsas e arbustos isolados ou em pequenos grupos. A savana é o bioma típico das regiões de clima tropical com estação seca (Aw e As na classificação de Köppen-Geiger), geralmente com escassez de água. A Figura 17 apresenta o mapa da vegetação da bacia do Jequitinhonha.

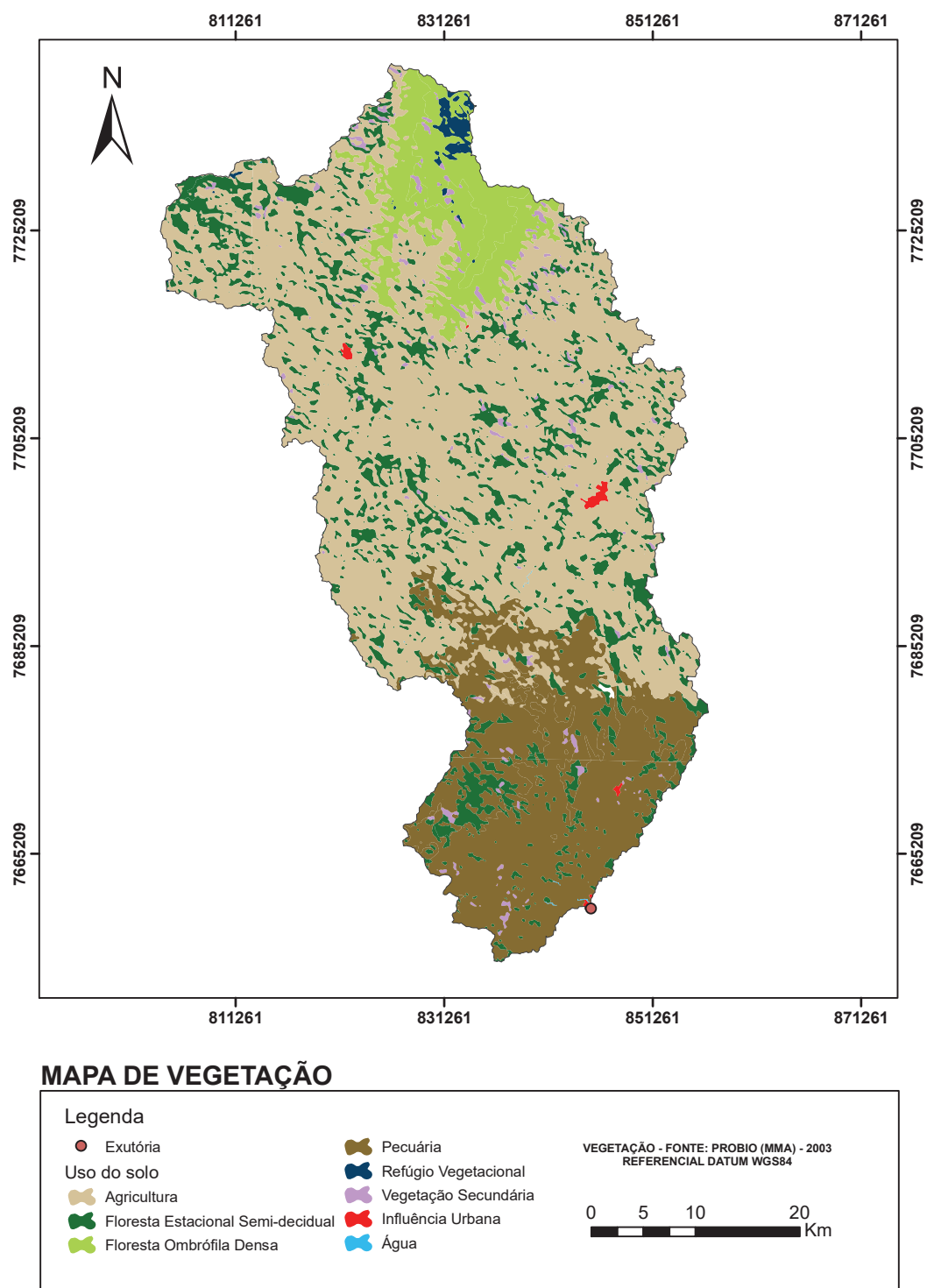


Figura 16 - Mapa da distribuição da vegetação/uso do solo na bacia do Rio Itabapoana

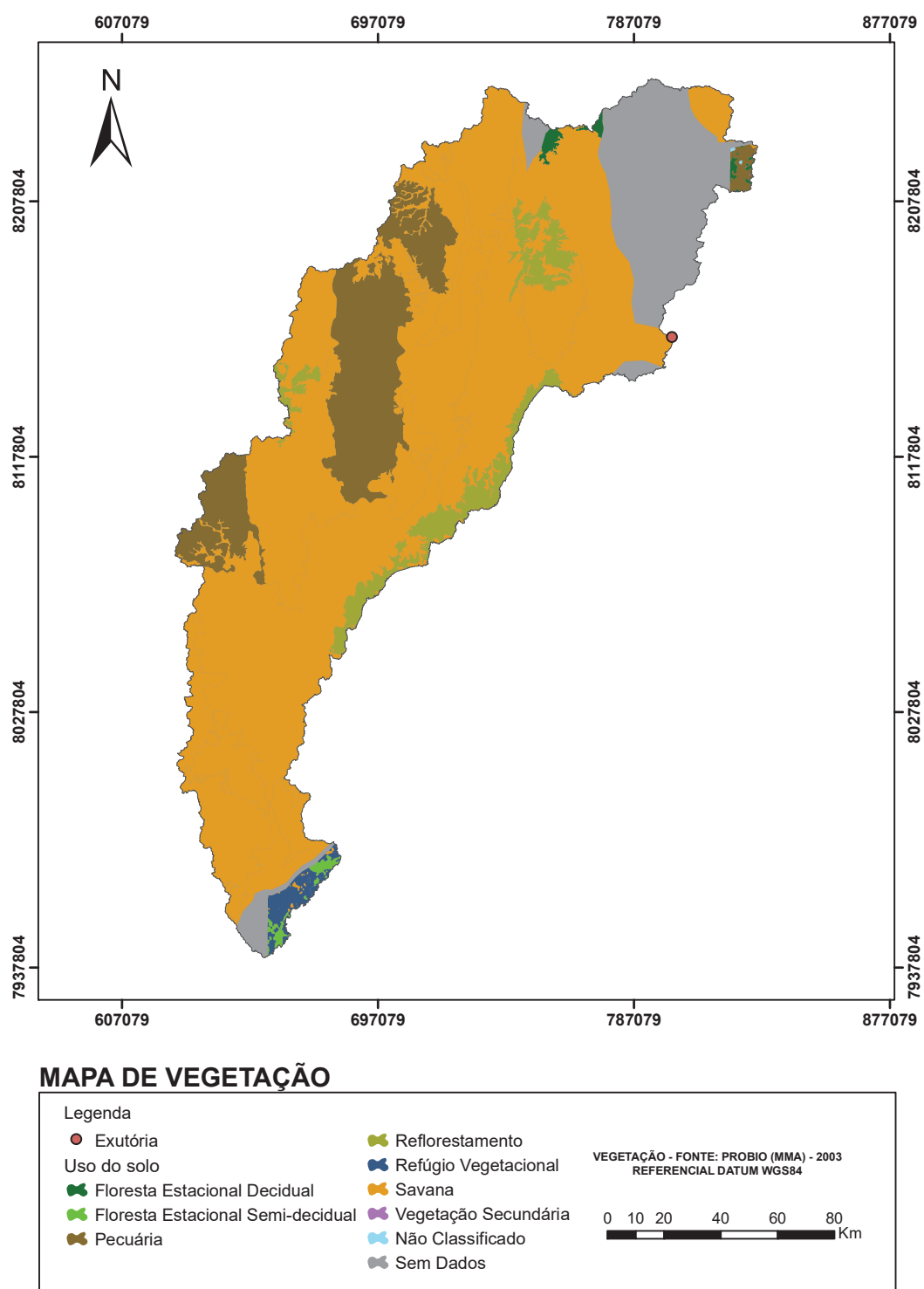


Figura 17 - Mapa da distribuição da vegetação/uso do solo na bacia do Rio Jequitinhonha

5 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO AO ESTUDO DE CASO

Foi utilizado o sistema de previsão de vazões desenvolvido em LACTEC e DELTARES, 2017. Este sistema utiliza o *software* Delft-Fews (Werner *et al.*, 2012) que agrega previsões pluviométricos por *ensemble*, modelo hidrológico Sacramento distribuído, modelos de propagação de vazão Muskingum e modelo hidrodinâmico SOBEK além de operação hidráulica dos reservatórios com otimização. O Muskingum é utilizado para propagar vazões entre as sub-bacias a montante do reservatório, onde não há influência do remanso e o Sobek é utilizado a jusante.

O método proposto tem duas opções: a *fuzificação* das vazões previstas de um *ensemble* de vazões previstas ou a *fuzificação* das precipitações previstas de um *ensemble* pluviométrico.

Na versão de *fuzificação* das vazões previstas, o método entra no sistema entre a previsão hidrológica por *ensemble* e a otimização do reservatório. Na versão de *fuzificação* das previsões de precipitação o método proposto entra no sistema entre a previsão pluviométrica por *ensemble* e a modelagem chuva-vazão.

As etapas do trabalho de Pesquisa e Desenvolvimento (LACTEC e DELTARES, 2017) são descritas nos itens 5.1, 5.2, 5.4 e 5.5 a seguir. O método, aqui proposto, é aplicado ao estudo de caso e é descrito no item 5.3 a seguir.

5.1 PREVISÃO PLUVIOMÉTRICA

Utilizaram-se as previsões pluviométricas globais por *ensemble* obtidas no site da TIGGE. Este site disponibiliza de forma gratuita as previsões meteorológicas globais por *ensemble* históricas de vários institutos meteorológicos de todo o mundo. São utilizados nesta pesquisa os dados do CPTEC, do ECMWF e do NCEP (GEFS).

O ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) é um instituto de pesquisa meteorológica intergovernamental suportado por 34 países da Europa com sede da Inglaterra. O NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) é um instituto com sede nos Estados Unidos e faz parte da NOAA (*National oceanic and atmospheric administration*). O CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) é um instituto ligado ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) com sede no Brasil.

5.2 MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO

As bacias hidrográficas de Itapaboana e Jequitinhonha foram divididas em sub-bacias conforme a disponibilidade de dados de vazões de estações fluviométricas fora do alcance do remanso dos reservatórios de Rosal e Irapé. Para cada uma destas sub-bacias foi aplicado o modelo chuva-vazão. A vazão do eixo da barragem foi obtida propagando as vazões das sub-bacias até a barragem e somando com a vazões proveniente do modelo chuva-vazão da bacia incremental.

O modelo chuva-vazão escolhido foi o “Sacramento” e utilizou-se o *software Rainfall Runoff Library* (RRL) para auxílio na calibração, pois possui funções de otimização para automatizar o processo de obtenção dos parâmetros. O esquema do modelo e seus parâmetros é mostrado na Figura 5 e Tabela 1 do capítulo 2.

Escolheu-se o modelo Sacramento por ser um modelo amplamente conhecido e aceito entre os hidrólogos pela sua eficiência.

O RRL foi desenvolvido pelo *CRC - Cooperative Research*, em um programa de previsão de vazões na Austrália (CRC, 2004). RRL considera o modelo Sacramento aplicado de forma concentrada. Como a configuração dentro do SOBEK contempla o modelo Sacramento distribuído, os testes de eficiência foram sempre obtidos considerando a aplicação dos parâmetros calibrados pelo RRL dentro do SOBEK, que é o pacote que será efetivamente considerado na operação em tempo real nas usinas de Rosal (rio Itapapoana) e Irapé (Rio Jequitinhonha).

Foram testadas todas as funções de otimização incluídas no RRL, entretanto, a que normalmente demonstrou melhor desempenho foi o algoritmo genético. A função objetivo utilizada foi o critério de Nash-Sutcliffe – NS - (Nash e Sutcliffe, 1970 *apud* Gottschalk e Motovilov, 2000), tendo-se o cuidado de verificar a ordem de grandeza da tendenciosidade (BIAS), o erro padrão (RMSE), o erro absoluto médio (MAE) e o coeficiente de correlação de Pearson (r), calculados de acordo com as equações 3.12, 5.1 a 5.3, e 3.13.

$$BIAS = \frac{1}{N} \left(\sum \hat{Q} - \sum Q \right) \quad (5.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\hat{Q} - Q)^2} \quad (5.2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |\hat{Q} - Q| \quad (5.3)$$

$$r = \frac{\sum (Q - \bar{Q})(\hat{Q} - \hat{\bar{Q}})}{\sqrt{\sum (Q - \bar{Q})^2 \sum (\hat{Q} - \hat{\bar{Q}})^2}} \quad (5.4)$$

Onde:

Q = vazão observada

\hat{Q} = vazão estimada

N = número de pontos amostrais

\bar{Q} = vazão observada média

$\hat{\bar{Q}}$ = vazão estimada média

Além das métricas acima, foi comparado o volume dos hidrogramas observados e calculados e realizou-se uma análise visual do comportamento dos hidrogramas.

A estimativa dos parâmetros do modelo foi realizada de maneira convencional, na qual, sobre os dados históricos é separado um período para a calibração e outro para a validação. A calibração utilizando as ferramentas de otimização do RRL depende dos valores iniciais dos parâmetros do modelo. Estes valores iniciais são muito dependentes dos eventos selecionados e também da bacia analisada. Foi considerada a variação usual obtida na literatura (Anderson *et al.*, 2006; Koren *et al.*, 2000). A calibração foi realizada em nível diário, entretanto, sempre que possível (disponibilidade de informações horárias na rede telemétrica), os resultados foram verificados considerando a análise da eficiência do modelo SOBEK simulando em condições horárias.

Não foi possível aplicar uma abordagem semi-distribuída na calibração por falta de dados em estações a montante nas bacias do Itabapoana e Jequitinhonha,

Os dados de entrada do modelo consistem em evapotranspiração, precipitação e vazão (este último para a calibração). Na sequência descrevemos estas variáveis e sua utilização no modelo.

Em vários estudos, o método de Penman tem se mostrado superior dentre os vários métodos de cálculo para estimativa de evapotranspiração. Silva em 1977 e Mota em 1975 (*apud* IPAGRO, 1981), relatam bons resultados do método. Chang (1968 *apud* Berlato e Molion, 1981) afirma que evidências experimentais suportam

a assertiva de que a equação de Penman é a melhor. Jensen (1973 *apud* IPAGRO, 1981) também confirma uma correlação entre valor estimado e observado melhor para este método em relação a outros. Jensen testou os métodos de Thornthwaite, Makkink, Blaney-Criddle e Jensen-Haise além do Penman e todos exceto o Penman subestimaram o valor da evapotranspiração potencial.

O método de Penman combina o balanço de energia com aproximação aerodinâmica e foi desenvolvido por Penman em 1948 e melhorado em 1956. Para a estimativa da evapotranspiração por este método são necessários dados de radiação solar, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento a 2 m de altura.

Os dados necessários para a utilização do Penman são comuns no Brasil. Entretanto desejou-se ter uma série continua sem falhas de dimensão adequada o que não ocorreu para os dados necessários para o uso do Penman.

Segundo Doorenbos e Pruitt (1984, *apud* Fernandes *et al.* 2010) o método de Blaney-Criddle não é recomendado para regiões em que a temperatura do ar se mantiver estável como é o caso das duas bacias estudadas onde as temperaturas variam muito pouco, sendo 18°C a 24°C no Itabapoana e 21°C a 24°C no Jequitinhonha (médias de inverno e verão respectivamente).

Segundo Camargo (2000 *apud* Fernandes *et al.* 2010) o método de Thornthwaite subestima os valores de evapotranspiração para regiões áridas e semi-árida, entretanto tem estimativas melhores para regiões úmidas. Isto sugere uma boa estimativa para Itabapoana e uma subestimativa para Jequitinhonha,

Utilizou-se então a equação de Thornthwaite. Ortolani *et al.* 1966 (*apud* Ipagro 1977) compararam os métodos de Penman e Thornthwaite para dados de São Paulo e a correlação dos dados estimados e observados para o Método de Penman foi superior ao do Thornthwaite ($R = 0,95$ contra $0,84$).

A evapotranspiração EVT foi estimada pelo método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948 *apud* LACTEC e DELTARES, 2014), expresso pelas equações (5.5), (5.6) e (5.7):

$$EVT = 16 \left(10 \frac{T_j}{m} \right)^c \quad (5.5)$$

$$m = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1,514} \quad (5.6)$$

$$c = 0,000000675 m^3 - 0,0000771 m^2 + 0,0179 m + 0,49239 \quad (5.7)$$

Onde:

EVT : Evapotranspiração (mm/mês);

m : índice térmico anual ou índice de calor anual;

T_j : temperatura média mensal do mês j ($^{\circ}C$).

Os dados utilizados de evapotranspiração consistem em médias mensais de longo período. Para obter os valores na escala diária foi utilizado um modelo de desagregação utilizando uma função interpoladora definida pela série de Fourier (Kaviski *et al*, 2005). A precipitação média em cada uma das sub-bacias, dentro do Sobek, consideradas na discretização foi obtida pelo método de Thiessen. As estações climatológicas utilizadas são apresentadas na Tabela 4 e Figura 18.

Tabela 4 – Estações climáticas consideradas na obtenção da evapotranspiração

Bacia	Código OMM (INMET)	Estação	Coordenadas	
Itabapoana	83646	Cachoeiro do Itapemirim	20°51'S	41°06'O
	83695	Itaperuna	21°12'S	41°54'O
Jequitinhonha	83538	Diamantina	18°15'S	43°36'O
	83437	Montes Claros	16°41'S	43°50'O
	83442	Araçuaí	16°50'S	42°03'O
	83440	Minas Novas	17°14'S	42°35'O
	83488	Itamarandiba	17°51'S	42°51'O

A seleção de postos pluviométricos e fluviométricos incluiu as estações telemétricas da CEMIG e as estações convencionais com períodos razoáveis de dados. Estações fluviométricas de áreas de drenagem muito pequenas ou situadas próximas em uma mesma bacia não foram utilizadas. As estações fluviométricas e pluviométricas convencionais foram utilizadas para realizar a calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão. As estações telemétricas não foram utilizadas neste processo devido à intermitência de operação e qualidade dos dados. No entanto, são estas as estações cujos dados são acessados durante a operação do sistema de previsão em tempo real. Desta forma, devem, nesta fase, estar operando

de maneira adequada. Além disto, são utilizadas estações telemétricas de outras entidades, quando disponíveis.

A consistência dos dados pluviométricos se baseou na obtenção das curvas duplo acumulativas de chuvas mensais. Assim, foram descartados períodos ou estações de dados duvidosos. Observou-se que algumas estações telemétricas da CEMIG devem ser submetidas a um processo de calibração do equipamento, pois apresentam inconsistências verificadas na curva duplo acumulativas. Estas estações não foram utilizadas. A precipitação média em cada uma das sub-bacias consideradas na discretização foi obtida pelo método de Thiessen.

A consistência dos dados fluviométricos se baseou na plotagem simultânea dos hidrogramas, na avaliação da variação da vazão média específica e na avaliação das curvas de descarga. As curvas de descarga apresentaram-se boas e com um pequeno trecho extrapolado (com exceção da estação fluviométrica de S.J do Calçado), isto porque os rios são na maioria de regimes hidrológicos regulares sendo possível obter medições em altas vazões. Portanto as curvas não foram retraçadas e também não foi necessário analisar a adequação da extrapolação das curvas de descarga mais criteriosamente. As estações telemétricas da CEMIG, apesar de possuírem falhas ou erros de operação em inúmeras ocorrências e por longos períodos, quando em operação normal os valores de vazão são normalmente condizentes com os das estações convencionais próximas.

5.2.1 Calibração dos parâmetros da bacia do rio Itabapoana

A Tabela 5 apresenta as estações pluviométricas da bacia do rio Itabapoana e a Tabela 6 as estações fluviométricas. A Figura 19 apresenta a localização das estações pluviométricas e fluviométricas principais da bacia. Estas estações estão divididas em duas categorias: estações telemétricas da CEMIG e estações convencionais de outras entidades. As estações da CEMIG ainda não possuem código, pois estão passando pelo processo de aprovação pela ANA (Agência Nacional de Águas). Todas as estações se encontram em operação.

Para este modelo, a exutória da bacia foi definida na estação de medida de descarga na Ponte do Itabapoana, localizada a 30 km a jusante da cidade de Bom Jesus do Itabapoana. A bacia (2830 km²) foi discretizada em 169 microbacias, com

áreas que variam de 0,04 km² a 78,24 km² e com uma média de 16,74 km². A Figura 20 apresenta a divisão da área estudada em sub-bacias.

As estruturas hidráulicas da UHE Rosal compreendem duas turbinas e um vertedouro. No SOBEK estas estruturas hidráulicas são modeladas por duas bombas (uma bomba para as duas turbinas e outra para o vertedouro) cujas descargas serão fornecidas pelo modelo de otimização do reservatório.

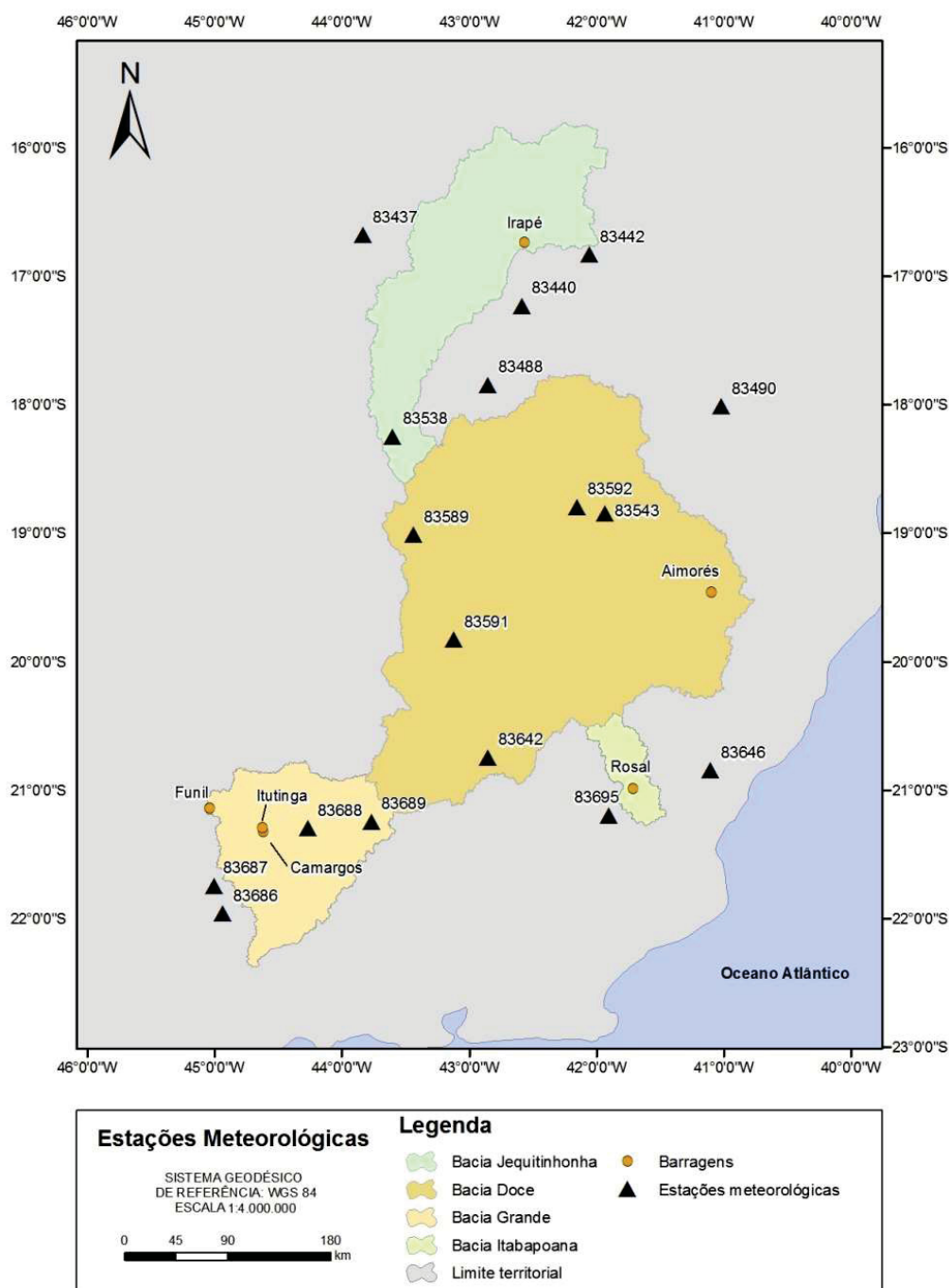


Figura 18 – Estações climáticas consideradas na obtenção da evapotranspiração (Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014)

Tabela 5 – Estações pluviométricas principais - Bacia do rio Itabapoana

Código	Nome	Entidade	Latitude	Longitude	Início
02041001	Guaçuí	ANA	-20,7736	-41,6817	Ago/1937
02041005	Caiana	ANA	-20,6939	-41,9219	Nov/1939
02041014	Dores do Rio Preto	ANA	-20,6858	-41,8461	Ago/1948
02041015	Fazenda Monte Alegre	ANA	-20,9447	-41,4008	Jan/1952
02041016	Ibitirama	ANA	-20,5406	-41,6656	Fev/1954
02041017	Santa Cruz - Caparão	ANA	-20,3228	-41,7042	Mar/1956
02041044	Caparão	INMET	-20,5167	-41,8667	Nov/1972
02041046	Varre - Sai	ANA	-20,9308	-41,8500	Jun/1967
02042000	Carangola	ANA	-20,7400	-42,0239	Out/1934
02141014	Ponte de Itabapoana	ANA	-21,2061	-41,4628	Abr/1937
02141015	Mimoso do Sul (DNOS)	ANA	-21,0647	-41,3625	Jul/1953
02141016	São Jose do Calçado	ANA	-21,0367	-41,6522	Set/1952
--	Rosal	CEMIG	-20,9531	-41,7168	Jul/2011
--	Rosal Mont. F.Volta Grande	CEMIG	-20,8744	-41,7185	Set/2012
--	Guacui Ponte	CEMIG	-20,7732	-41,6808	Jul/2011
--	Fazmao	CEMIG	-20,8018	-41,7742	Jul/2011
--	Pq Caparaó	CEMIG	-20,4222	-41,8537	Fev/2012

Tabela 6 – Estações fluviométricas principais - Bacia do rio Itabapoana

Código ⁽¹⁾	Nome	Rio	Área (km ²)	Operador	Latit.	Longit.	Início
57700000	Caiana	São João	447	ANA	-20,695	-41,921	Out/1935
57720000	Dores do Rio Preto	Preto	234	ANA	-20,686	-41,847	Ago/1948
57740000	Guaçuí	do Veado	413	ANA	-20,772	-41,681	Ago/1937
--	Guaçuí Ponte	do Veado	413	CEMIG	-20,773	-41,681	Jul/2011
--	Fazmao	Itabapoana	990	CEMIG	-20,802	-41,774	Jul/2011
--	Rosal montante faz. Volta Grande ⁽²⁾	Itabapoana	1713	CEMIG	-20,874	-41,719	Fev/2013
--	Rosal	Itabapoana	1775	CEMIG	-20,953	-41,717	Jul/2011
57770000	São J. Calçado	Calçado	146	ANA	-21,037	-41,652	Set/1952
57830000	Ponte do Itabapoana	Itabapoana	2854	ANA	-21,206	-41,464	Set/1930

Obs. ⁽¹⁾ Todas as estações se encontram em operação

⁽²⁾ Estação de nível

Para a bacia do rio Itabapoana a disponibilidade de estações fluviométricas não permitiu uma discretização espacial suficiente para aplicar a abordagem distribuída conforme as microbacias da Figura 20, entretanto permitiu a utilização

da forma distribuída conforme a Figura 21 que foi utilizada na avaliação dos parâmetros. O conjunto de parâmetros obtidos para estes locais são estendidos para as áreas imediatamente a jusante das exutórias ou em áreas incrementais do entorno. A precipitação média aplicada nestas bacias foi obtida pela média ponderada pela área de drenagem das precipitações verificadas em cada uma das microbacias da discretização, as quais foram anteriormente obtidas por Thiessen.

O otimizador que possibilitou melhor desempenho dos parâmetros foi o algoritmo genético. A Tabela 7 apresenta os períodos de aquecimento, calibração e validação considerados.

A Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros obtidos na calibração do modelo Sacramento. Os significados dos parâmetros estão mostrados na Tabela 1 no item 2.3.1.

Tabela 7 – Períodos de aquecimento, calibração e validação do modelo - Bacia do rio Itabapoana

	Período da calibração	Período da validação
Aquecimento	01/01/2005 a 30/04/2005	01/03/2008 a 30/07/2008
Calibração	01/05/2005 a 29/02/2008	-----
Validação	-----	01/08/2008 a 31/03/2011

A Tabela 9 mostra os resultados das métricas obtidas considerando a aplicação dos parâmetros calibrados no modelo SOBEK conforme a configuração que será adotada no sistema de previsão. As métricas são as apresentadas nas equações (5.1) a (5.4). O índice NS varia de menos infinito a 1 sendo 1 ótimo. Valores de R^2 mais próximos de 1 são os melhores ajustes. Nos demais índices da Tabela 9 os melhores ajustes são quando o número se aproxima de zero.

Da Figura 22 até a Figura 25 são apresentados os hidrogramas simulados e observados para os períodos de calibração e verificação. Nestas figuras a linha vermelha é o previsto pelo modelo sacramento com dados de chuvas observados e em preto os dados de vazões observados. Pode-se observar que de maneira geral o simulado segue a mesma tendência do observado, os picos dos hidrogramas ocorrendo conjuntamente, visualmente os volumes dos hidrogramas de cheias tendem a ser aproximados, tendência confirmada na tabela 9. A diferença da magnitude dos picos de cheia não é boa, entretanto é razoável.

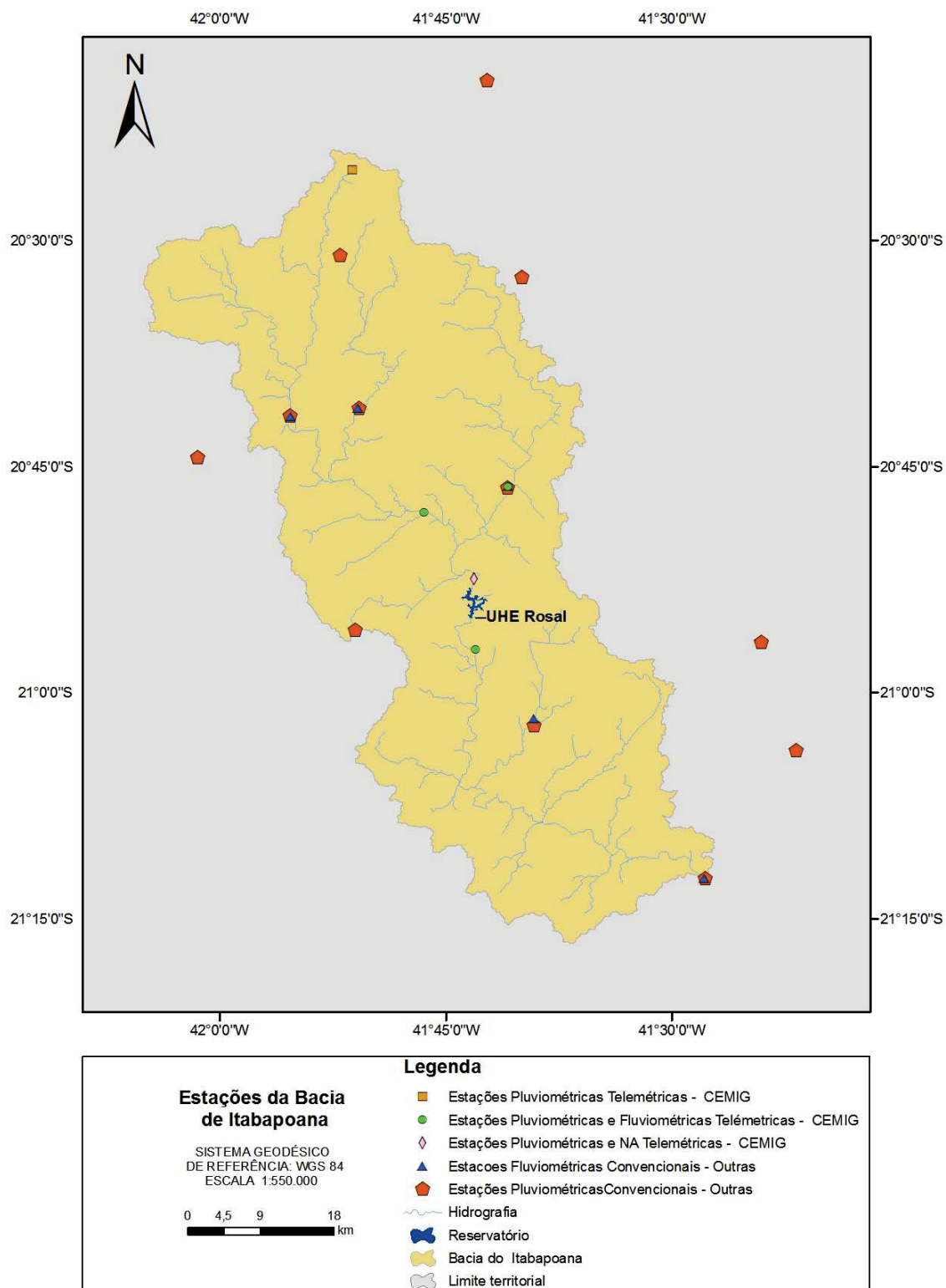


Figura 19 – Estações pluviométricas e fluviométricas principais - Bacia do rio Itabapoana.
(Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014)

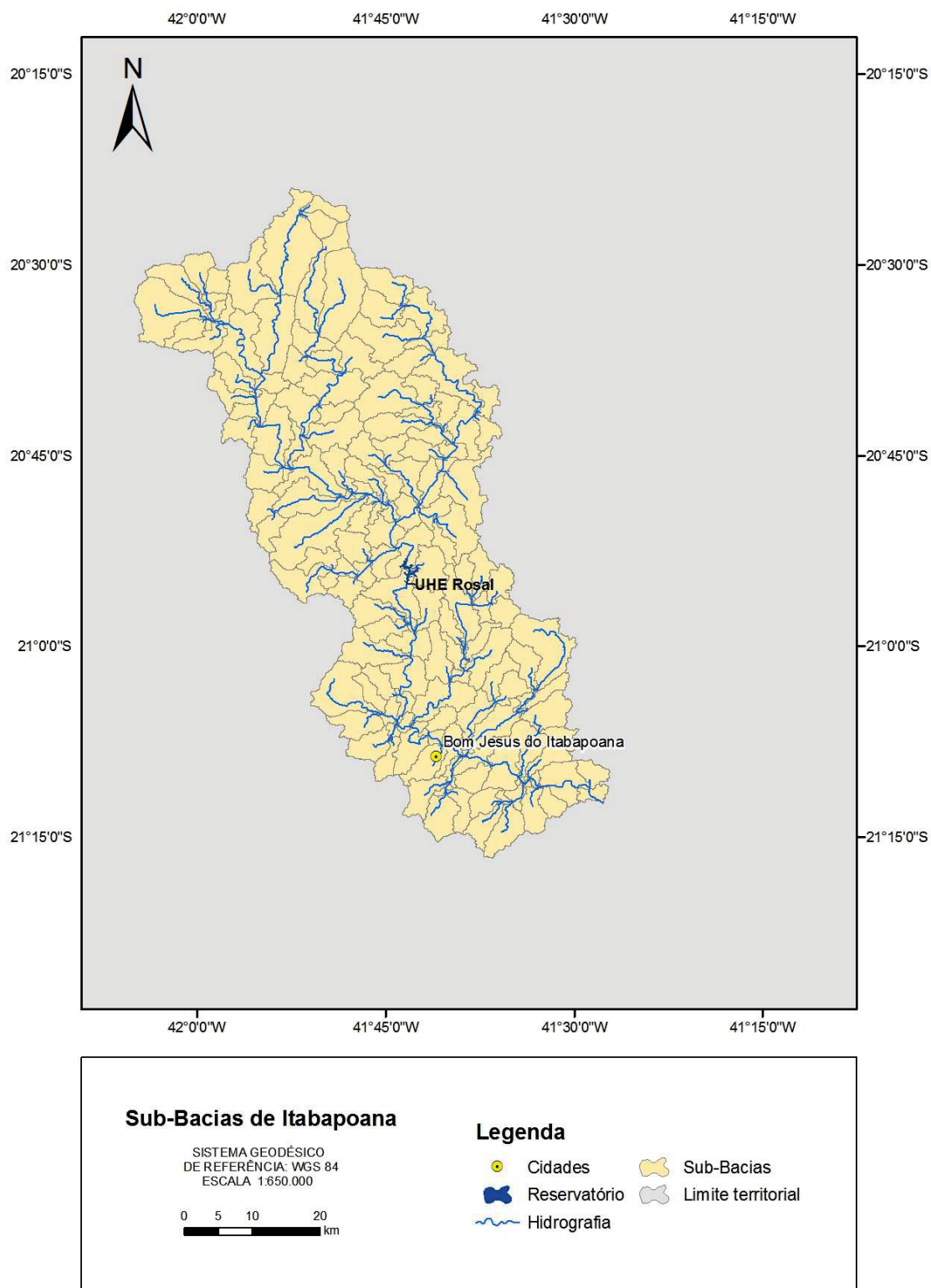


Figura 20 – Discretização da área estudada em microbacias - Bacia do rio Itabapoana.
(Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014)

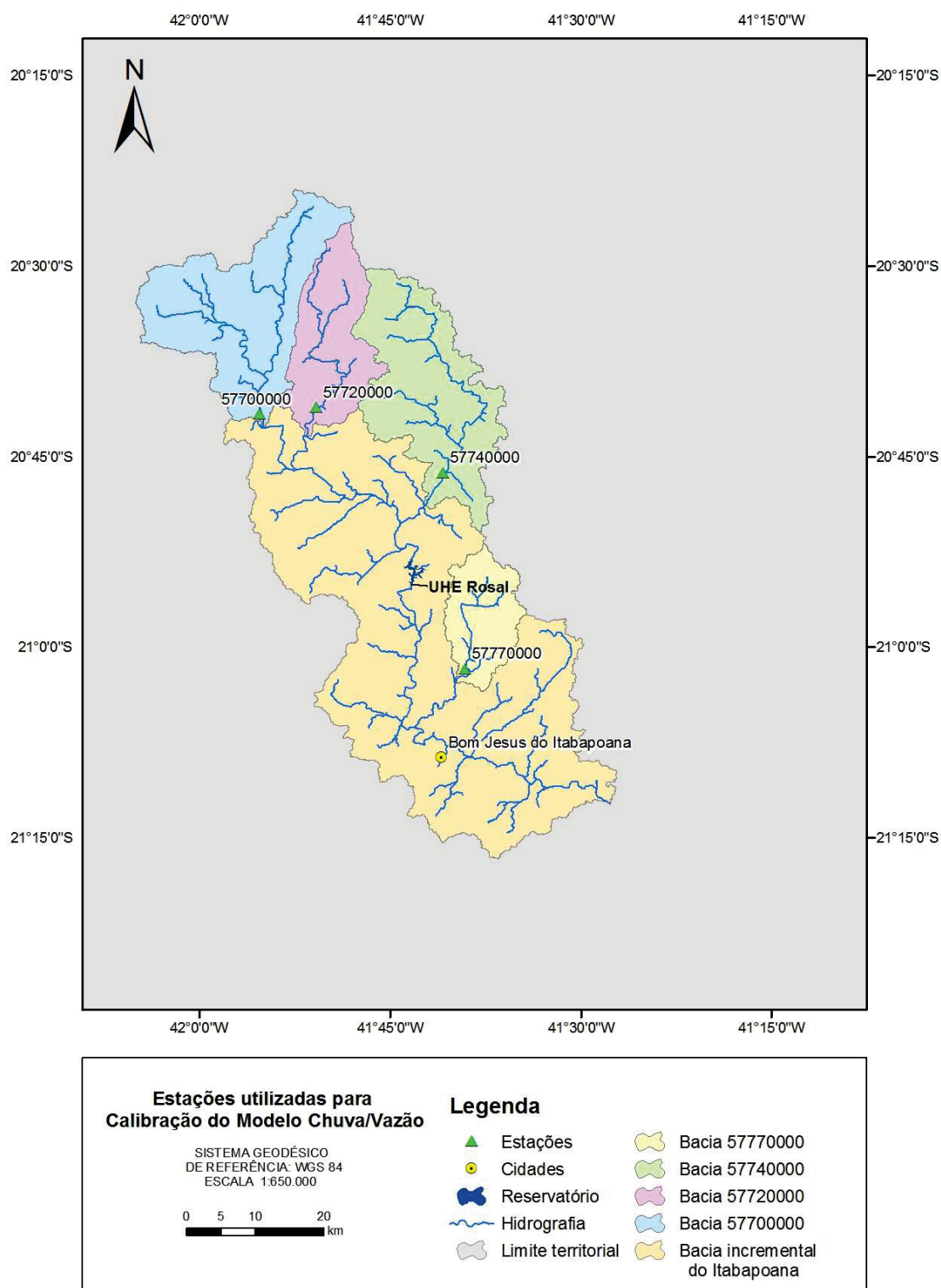


Figura 21 – Discretização em sub-bacias conforme configuração considerada na calibração - Bacia do rio Itabapoana.
(Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014)

Tabela 8 – Valores estimados dos parâmetros - Bacia do rio Itabapoana

Parâmetro	Unidades	Faixa de variação	Caiana (57700000)	Dores do Rio Preto (57720000)	Guaçuí (57740000)	São José do Calçado (57770000)
ADIMP	--	0 - 0,2	0,068	0,118	0,004	0,062
LZFPM	mm	0 - 1000	380	478	325	650
LZFSM	m	15 - 300	61	179	67	148
LZPK	1/dia	0,001 - 0,015	0,006	0,009	0,008	0,007
LZSK	1/dia	0,03 - 0,2	0,186	0,114	0,043	0,190
LZTWM	mm	0 - 500	133	61	16	41
PCTIM	--	0 - 0,5	0,000	0,008	0,002	0,065
PFREE	--	0 - 0,4	0,365	0,395	0,370	0,391
REXP	--	1 - 3	2,678	2,137	2,129	1,220
RSERV	--	0 - 0,4	0,104	0,063	0,257	0,052
SARVA	--	0 - 0,5	0,000	0,027	0,000	0,000
SIDE	--	0 - 5	0,412	0,157	0,000	0,451
SSOUT	m ³ /s/km ²	0 - 1	0,004	0,000	0,000	0,000
UZFWM	mm	10 - 100	62	13	57	42
UZK	1/dia	0 - 0,5	0,106	0,225	0,282	0,331
UZTWM	mm	0 - 125	0,001	0,001	0,001	0,001
ZPERC	--	20 - 300	226	289	55	134

O desempenho das bacias Caiana, Guaçuí e Dores do Rio Preto são razoáveis, entretanto observa-se que para na bacia São José do Calçado não foi possível obter uma performance satisfatória. Isto se deve provavelmente por vários fatores: (a) o pequeno tamanho da bacia, o que gera respostas muito rápidas no hidrograma, e as extensas faixas de extrapolação observadas nas curvas de descarga são fatores que geram incertezas ou dificuldades na calibração; (b) todas as estações da bacia possuem fundo móvel, o que demandaria constante revisão e um maior número de medições para o traçado das curvas; (c) verificou-se, que a quantidade de medições de vazões utilizada para a geração das diversas curvas é sempre muito pequena. Além disso, o baixo desempenho da bacia de S. J. do

Calçado não afeta a vazão afluente da barragem por estar a jusante da barragem, porém situa-se a montante da cidade a ser protegida.

Não há dados telemétricos disponíveis em período satisfatório para realizar a análise da eficiência dos parâmetros calibrados aplicados na base horária.

Tabela 9 – Performance do modelo hidrológico - Bacia do rio Itabapoana

Métrica/Bacia		Caiana		Dores do Rio Preto		Guaçuí		São José do Calçado	
		Calib.	Verif.	Calib.	Verif.	Calib.	Verif.	Calib.	Verif.
NS	--	0,65	0,68	0,67	0,76	0,61	0,63	0,42	0,42
BIAS	(m ³ /s)	-0,52	1,11	-0,38	0,42	-0,22	2,26	-0,80	0,35
RMSE	(m ³ /s)	4,07	6,11	3,59	3,91	10,40	11,68	2,53	2,90
MAE	(m ³ /s)	2,49	2,89	1,74	2,27	5,22	5,91	1,21	1,44
R ²	(-)	0,68	0,70	0,67	0,76	0,66	0,73	0,48	0,43
Média simulada	(m ³ /s)	6,97	10,04	5,43	6,96	14,51	17,20	2,04	2,38
Média observada	(m ³ /s)	6,87	9,26	5,58	6,55	16,29	15,09	2,29	2,67
Diferença Volume *	%	-0,07	0,12	-0,06	0,06	-0,01	0,15	-0,28	0,13

* Valores positivos significam que o volume total estimado superou o observado

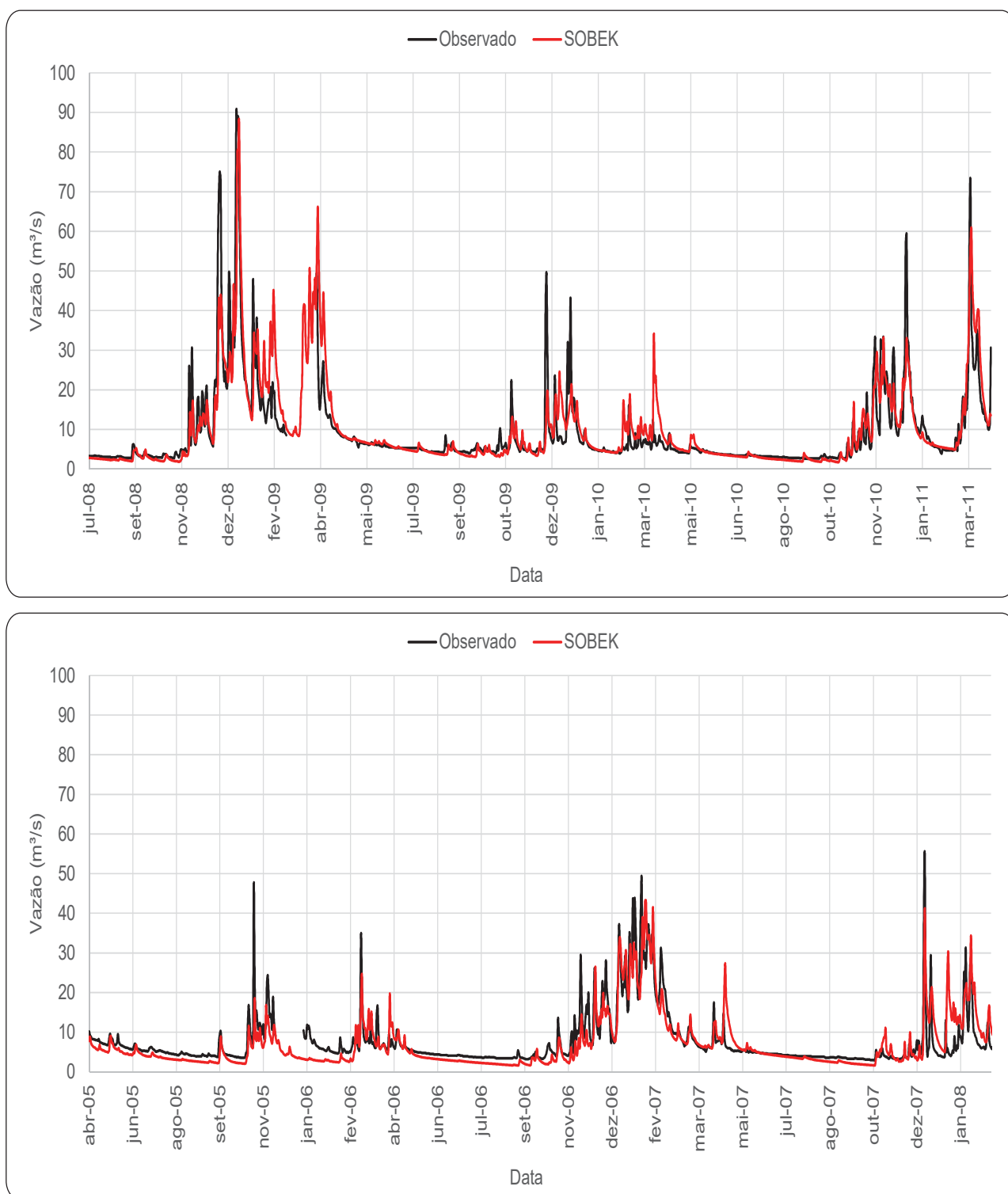


Figura 22 – Hidrogramas observados e simulados em Caiana no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

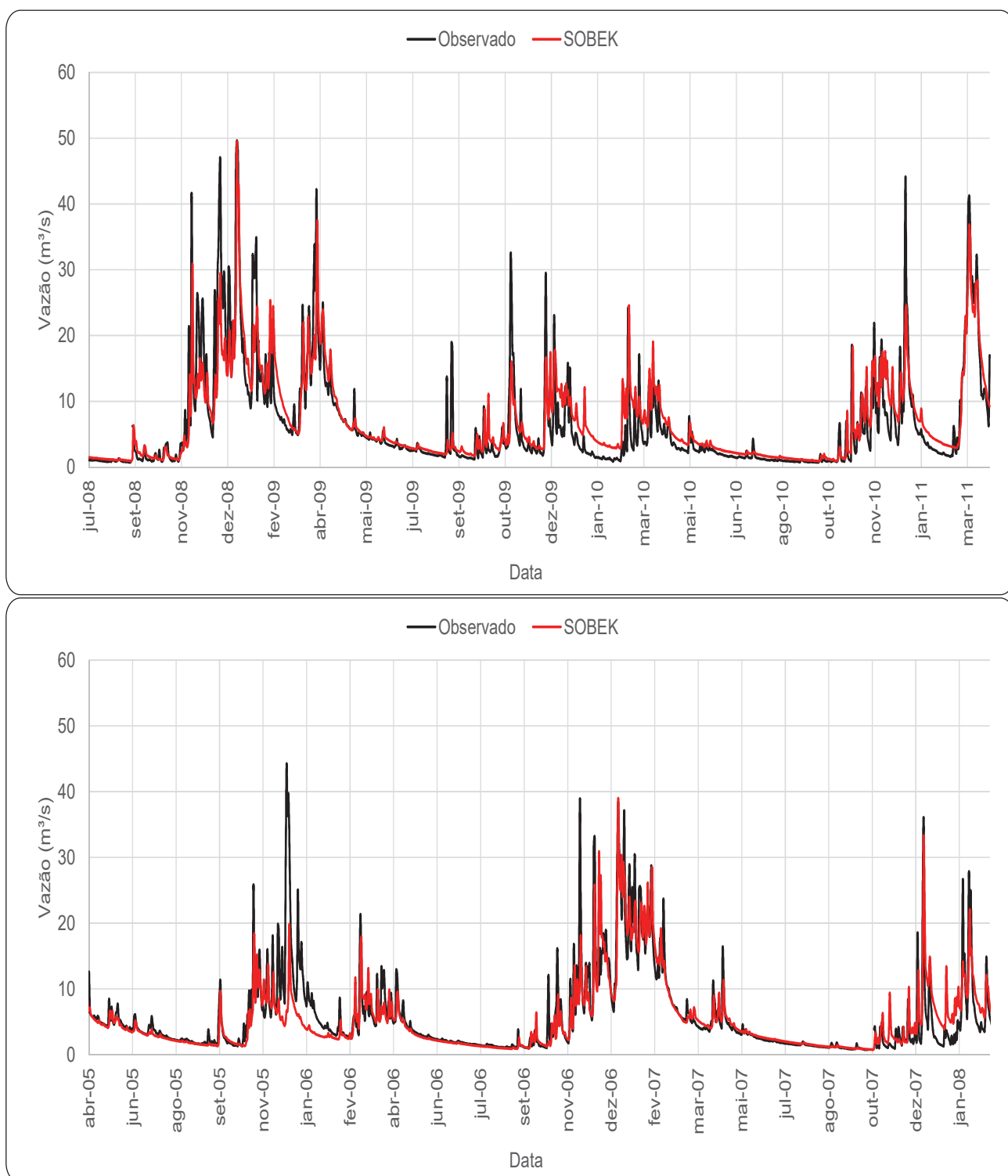


Figura 23 – Hidrogramas observados e simulados em Dorés do Rio Preto no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

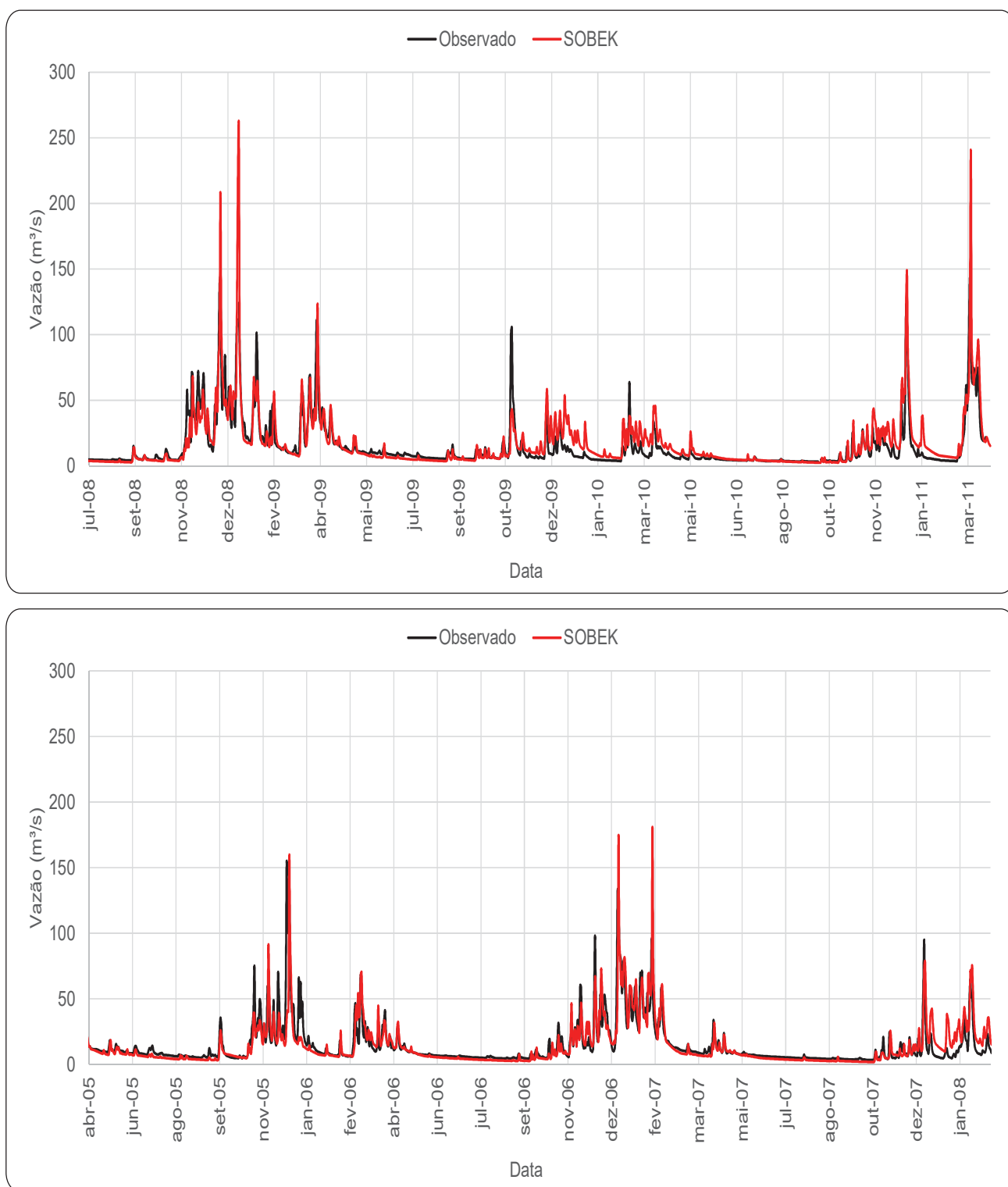


Figura 24 – Hidrogramas observados e simulados em Guaçuí no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

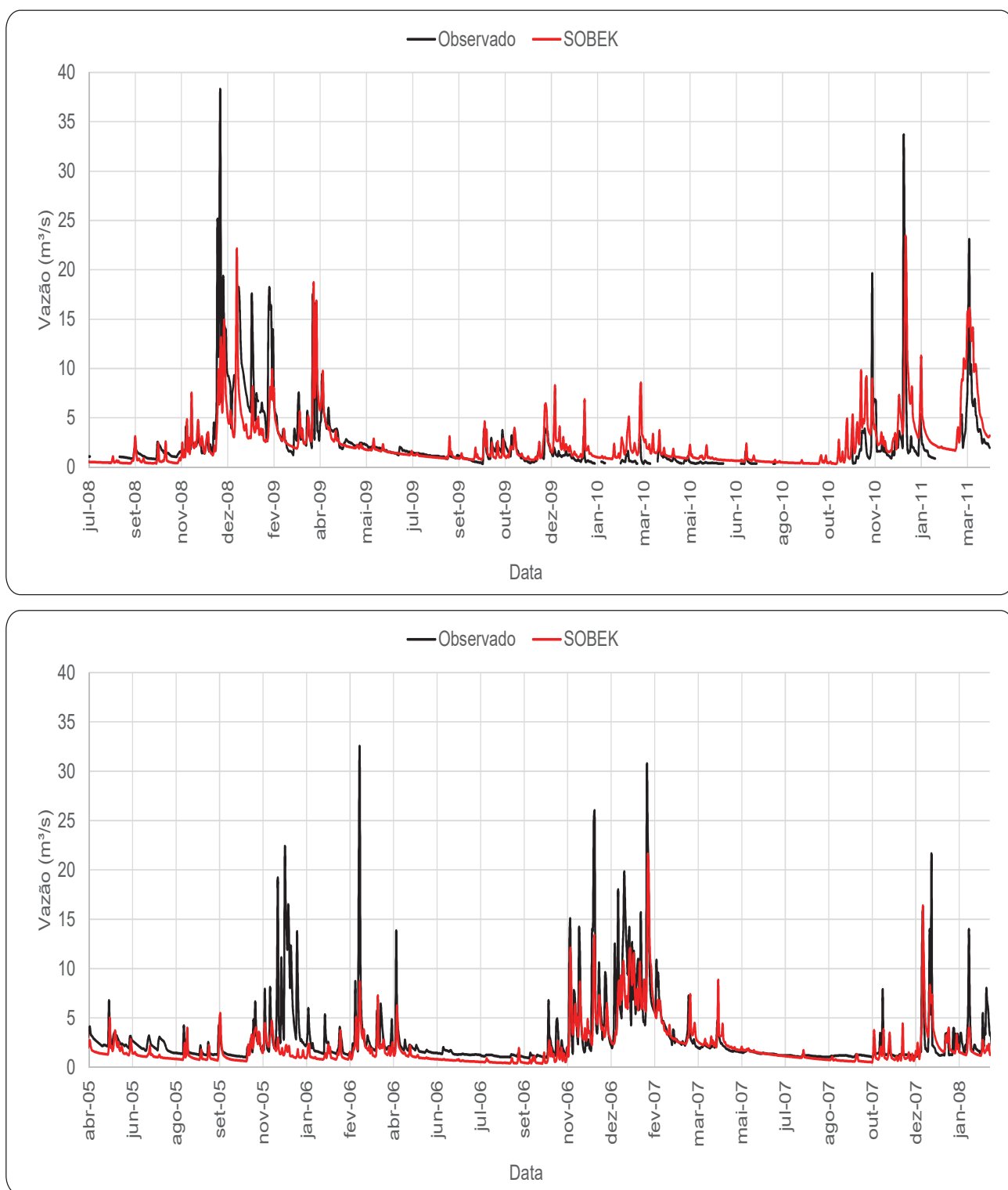


Figura 25 – Hidrogramas observados e simulados em São José do Calçado no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

5.2.2 Calibração dos parâmetros da bacia do rio Jequitinhonha

A Tabela 10, Tabela 11 e Figura 26 apresentam as estações fluviométricas e pluviométricas principais da bacia. Estas estações estão divididas em duas categorias: estações telemétricas da CEMIG e estações convencionais de outras entidades. As estações da CEMIG ainda não possuem código, pois estão passando pelo processo de aprovação pela ANA (Agência Nacional de Águas).

Para este modelo, a exutória da bacia foi definida na estação de medição de descarga Itira localizada a 29 km a jusante da cidade de Coronel Murta. A bacia (24.257 km²) foi discretizada em 93 microbacias, com áreas que variam de 4,5 km² a 1054 km² e com uma média de 261 km². A Figura 27 apresenta a divisão da área estudada em microbacias.

Tabela 10 – Estações fluviométricas principais - Bacia do rio Jequitinhonha

Código	Nome	Rio	Área (km ²)	Operadora	Latit.	Longit.	Início	Fim
54001000	Povoado de Vau	Jequitinhonha	379	ANA	-18,4172	-43,5256	Out/1999	--
54002990	Mendanha - Montante	Jequitinhonha	-	ANA	-18,1000	-43,5000	Out/1978	Mai/1991
54003000	Mendanha	Jequitinhonha	1392	ANA	-18,1000	-43,5000	Jan/1945	Dez/1982
54010000	Vila Terra Branca	Jequitinhonha	7780	ANA	-17,3167	-43,2000	Jun/1951	Jun/1980
54010005	Vila Terra Branca - Jusante	Jequitinhonha	7780	ANA	-17,3128	-43,2078	Jan/1980	--
--	VT.Branca Jus	Jequitinhonha	7708	CEMIG	-17,3152	-43,2132	Fev/2008	--
54060000	Porto Desejado	Jequitinhonha	9943	ANA	-17,0167	-42,8000	Abr/1943	Dez/1950
54110002	Grão Mogol (Faz. Jambeiro)	Itacambirucu	4100	ANA	-16,5900	-42,9167	Jan/1973	--
--	G.Mogol	Itacambirucu	4063	CEMIG	-16,5924	-42,9168	Set/2007	--
54150000	Porto Mandacaru	Jequitinhonha	16343	ANA	-16,6789	-42,4856	Out/1945	--
--	P.Mandacaru	Jequitinhonha	16343	CEMIG	-16,6785	-42,4871	Mar/2012	--
54165000	Ponte Vacaria	Vacaria	2556	ANA	-16,1933	-42,5850	Abr/1978	--
54193000	Rubelita	Salinas	2814	ANA	-16,4081	-42,2653	Abr/1995	--
54195000	Barra do Salinas	Jequitinhonha	23815	ANA	-16,6178	-42,3089	Out/1977	--
54200000	Coronel Murta	Jequitinhonha	23981	ANA	-16,6333	-42,2167	Jun/1937	Mai/1976
54530000	Itira	Jequitinhonha	39394	ANA	-16,7608	-42,0028	Jan/1979	Dez/2009
--	Irape	Jequitinhonha	15853	CEMIG	-16,7410	-42,5710	Jan/2007	--

Tabela 11 – Estações pluviométricas principais - Bacia do rio Jequitinhonha

Código ⁽¹⁾	Nome	Entidade	Latitude	Longitude	Início
01541025	Berizal	ANA	-15,7406	-41,8839	Dez/2004
01542016	Serra Branca	ANA	-15,6367	-42,9436	Jan/1983
01641010	Itinga	ANA	-16,6181	-41,7675	Jan/1977
01641013	Comercinho	ANA	-16,2961	-41,7903	Abr/1995
01641023	CBL	ANA	-16,7833	-41,9167	Jul/2005
01641024	Água Boa	ANA	-16,1103	-41,9278	Jul/2005
01641025	Barragem do Clóvis	ANA	-16,7089	-41,8017	Dez/2004
01642002	Coronel Murta	ANA	-16,6131	-42,1869	Jan/1937
01642007	Porto Mandacaru	ANA	-16,6789	-42,4856	Out/1945
01642008	Rubelita	ANA	-16,4119	-42,2683	Dez/1946
01642013	Pega	ANA	-16,8600	-42,3475	Dez/1945
01642014	Grão Mogol	ANA	-16,5906	-42,9186	Set/1972
01642026	Ponte Vacaria	ANA	-16,1931	-42,5942	Nov/1992
01642027	Barra do Salinas	ANA	-16,6178	-42,3089	Nov/1992
01642028	Itira	ANA	-16,7608	-42,0061	Ago/1992
01643027	Pensão Caveiras	ANA	-16,3108	-43,1056	Ago/2000
01643028	Riacho dos Machados	ANA	-16,0044	-43,0467	Ago/2000
01643036	Catuni	ANA	-16,2372	-43,2639	Dez/2002
01643038	Juramento	ANA	-16,8469	-43,5892	Dez/2002
01742008	Carbonita	ANA	-17,5325	-43,0122	Out/1973
01742020	Fazenda Facão	ANA	-16,9711	-42,1156	Fev/1985
01742022	Ponte Alta	ANA	-17,2825	-42,8078	Ago/1992
01742023	Minas Novas	ANA	-17,2192	-42,5889	Dez/1992
01742033	Aguada Nova	ANA	-17,0217	-42,0347	Dez/2004
01743002	Vila Terra Branca - Jusante	ANA	-17,3128	-43,2078	Out/1974
01743016	Itacambira	ANA	-17,0689	-43,3131	Abr/1995
01743018	Senador Modestino	ANA	-17,9531	-43,2467	Out/1999
01843003	Mendanha - Montante	ANA	-18,1133	-43,5203	Jun/1945
01843011	Serro	ANA	-18,5928	-43,4125	Jan/1984
01843012	Rio Vermelho	ANA	-18,2797	-43,0006	Mar/1984
01843015	Povoado de Vau	ANA	-18,4172	-43,5256	Out/1999
01843020	São João da Chapada	ANA	-18,0833	-43,8333	Nov/2004
--	Irape	CEMIG	-16,7410	-42,5710	Ago/2008
--	G.Mogol	CEMIG	-16,5924	-42,9168	Jun/2007
--	P.Mandacaru	CEMIG	-16,6785	-42,4871	Dez/2009
--	Igicatu	CEMIG	-16,8213	-42,6401	Jan/2000
--	VT.Branca Jus	CEMIG	-17,3152	-43,2132	Fev/2008
--	Diamantina	CEMIG	-18,2344	-43,6154	Jan/2000

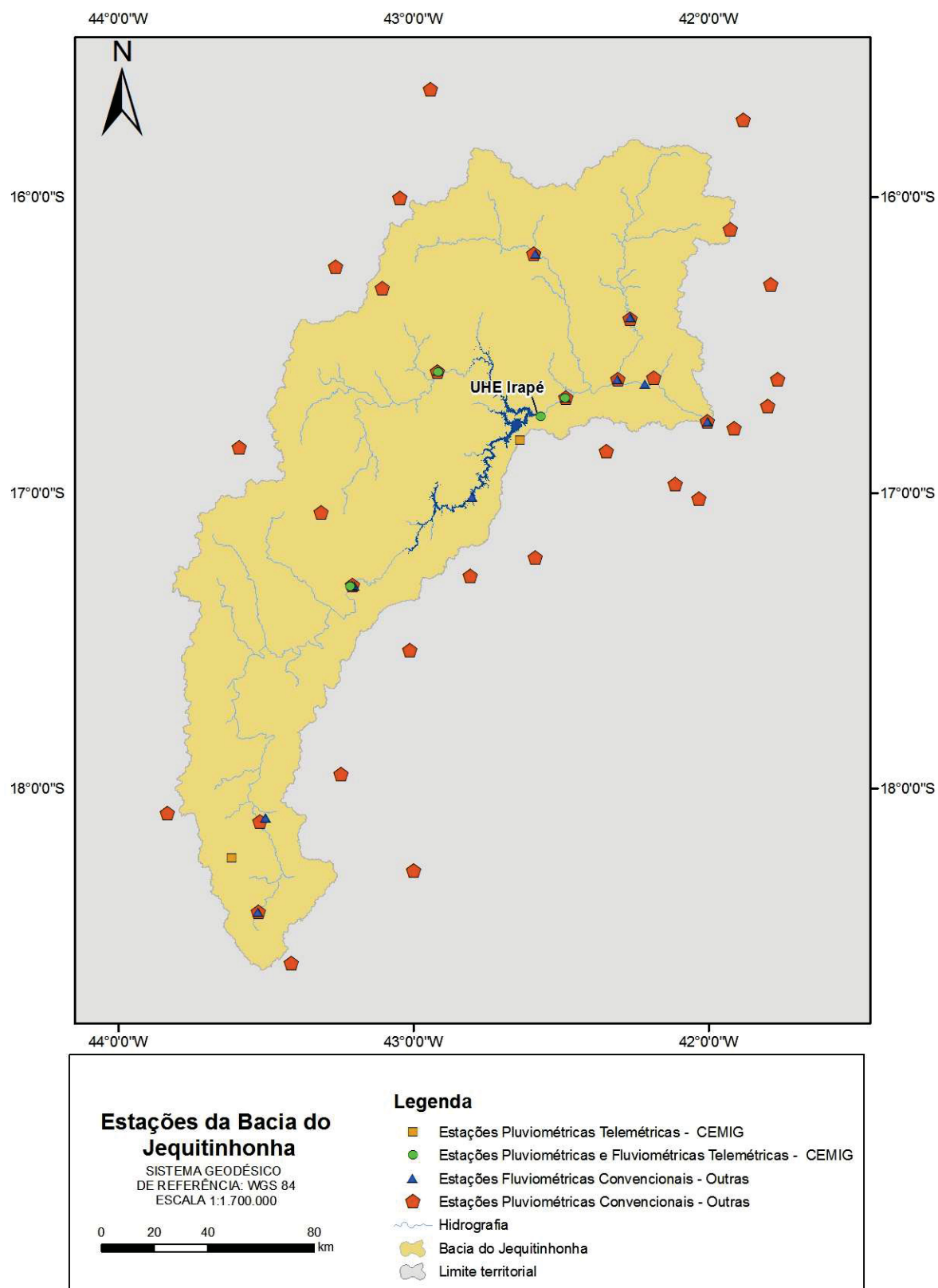


Figura 26 – Estações pluviométricas e fluviométricas principais - Bacia do rio Jequitinhonha.
(Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014)

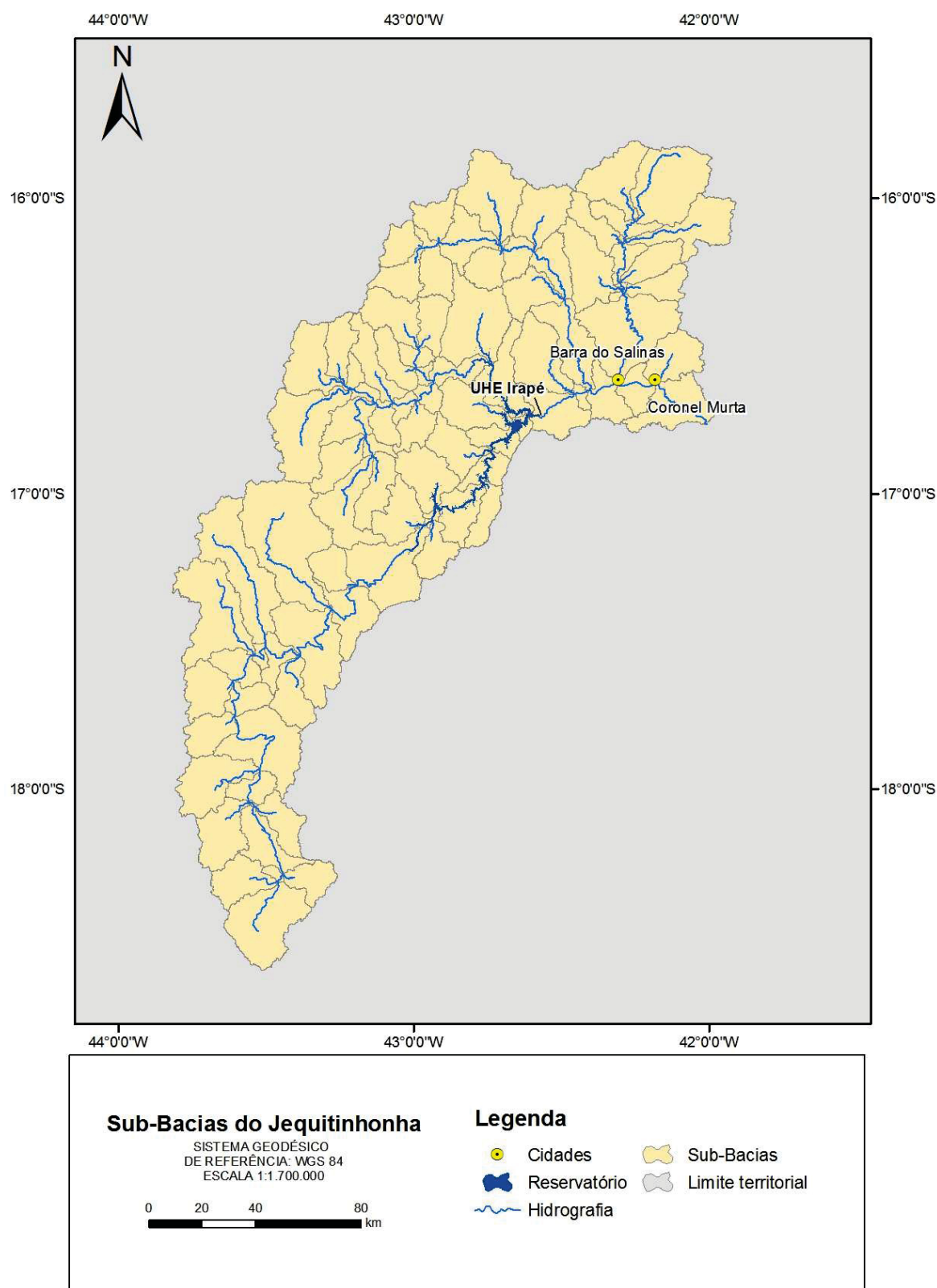


Figura 27 – Discretização da área estudada em microbacias - Bacia do rio Jequitinhonha.
 (Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014)

As estruturas hidráulicas da UHE Irapé compreendem três turbinas e um vertedouro. No SOBEK, estas estruturas hidráulicas são modeladas por duas bombas (uma bomba para as três turbinas e outra para o vertedouro) cujas descargas são fornecidas pelo modelo de otimização do reservatório.

Para a bacia do rio Jequitinhonha, a disponibilidade de estações fluviométricas não permitiu uma discretização espacial suficiente para aplicar a abordagem semi-distribuída. A Figura 28 apresenta as bacias consideradas na avaliação dos parâmetros. O conjunto de parâmetros obtidos para estes locais são estendidos para as áreas imediatamente a jusante das exutórias ou em áreas incrementais do entorno. A precipitação média aplicada nestas bacias foi obtida pela média ponderada pela área de drenagem das precipitações verificadas em cada uma das microbacias da discretização, as quais foram anteriormente obtidas por Thiessen.

O otimizador que possibilitou melhor desempenho dos parâmetros foi o algoritmo genético e os resultados foram melhores ao considerar a série de evapotranspiração. A Tabela 12 apresenta os períodos de aquecimento, calibração e verificação considerados.

Tabela 12 – Períodos de aquecimento, calibração e validação - Bacia do rio Jequitinhonha

	Período da calibração	Período da validação
Aquecimento	01/01/2004 a 31/12/2004	01/01/2008 a 31/12/2008
Calibração	01/01/2005 a 31/12/2008	-----
Validação	-----	01/01/2009 a 31/12/2012

A Tabela 13 apresenta os valores dos parâmetros obtidos na calibração através da aplicação das ferramentas do RRL. Os significados dos parâmetros estão mostrados na Tabela 1 no item 2.3.1. A Tabela 14 mostra os resultados das métricas obtidas considerando a aplicação dos parâmetros calibrados no modelo SOBEK conforme a configuração que será adotada no sistema de previsão. As métricas são as apresentadas nas equações (5.1) a (5.4). O índice NS varia de menos infinito a 1 sendo 1 ótimo. Valores de R^2 mais próximos de 1 são os melhores ajustes. Nos demais índices da Tabela 9 os melhores ajustes são quando o número se aproxima de zero.

Da Figura 29 até a Figura 32 apresentam-se os hidrogramas simulados e observados para os períodos de calibração e verificação. Nestas figuras a linha vermelha é o previsto pelo modelo sacramento com dados de chuvas observados e em preto os dados de vazões observados. Pode-se observar que de maneira geral o simulado segue a mesma tendência do observado, os picos dos hidrogramas ocorrendo conjuntamente, visualmente os volumes dos hidrogramas de cheias tendem a ser aproximados, tendência confirmada na tabela 14. A diferença da magnitude dos picos de cheia não é boa, entretanto é razoável.

Tabela 13 – Valores estimados dos parâmetros - Bacia do rio Jequitinhonha

Parâmetro	Unidades	Faixa de variação	V.T.Branca Jus (54010005)	Grão Mogol (54110002)	Rubelita (54193000)	Ponte Vacaria (54165000)
ADIMP	--	0 - 0,2	0,10	0,08	0,00	0,05
LZFPM	mm	0 - 1000	139	325	176	745
LZFSM	m	15 - 300	63	176	163	220
LZPK	1/dia	0,001 - 0,015	0,01	0,01	0,001	0,001
LZSK	1/dia	0,03 - 0,2	0,20	0,18	0,18	0,09
LZTWM	mm	0 - 500	237	221	249	498
PCTIM	--	0 - 0,5	0,01	0,00	0,02	0,01
PFREE	--	0 - 0,4	0,63	0,69	0,40	0,38
REXP	--	1 - 3	1,84	1,23	2,00	1,00
RSERV	--	0 - 0,4	0,30	0,05	0,08	0,30
SARVA	--	0 - 0,5	0,01	0,00	0,00	0,01
SIDE	--	0 - 5	0,00	0,88	2,59	0,00
SSOUT	m³/s/km²	0 - 1	0,00	0,00	0,00	0,00
UZFWM	mm	10 - 100	56	14	22	76
UZK	1/dia	0 - 0,5	0,26	0,21	0,17	0,49
UZTWM	mm	0 - 125	36	88	124	125
ZPERC	--	20 - 300	111	84	213	75

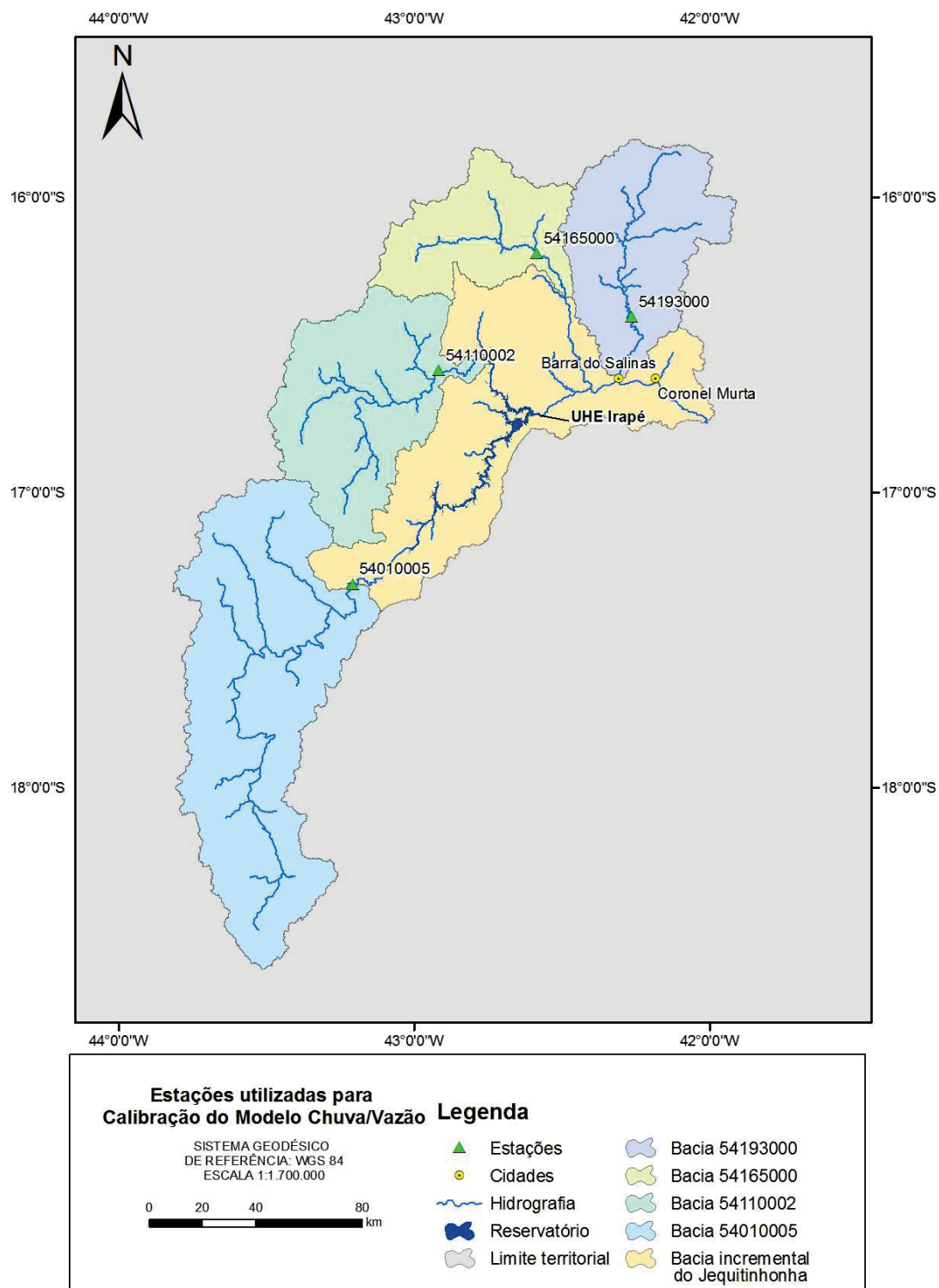


Figura 28 – Discretização em sub-bacias conforme configuração considerada na calibração - Bacia do rio Jequitinhonha.
(Fonte: LACTEC e DELTARES, 2014)

Tabela 14 – Performance do modelo hidrológico - Bacia do rio Jequitinhonha

Métrica/Bacia		V.T.Branca Jus (54010005)		Grão Mogol (54110002)		Rubelita (54193000)		Ponte Vacaria (54165000)	
		Calib.	Verif.	Calib.	Verif.	Calib.	Verif.	Calib.	Verif.
NS	--	0,83	0,80	0,64	0,79	0,22	0,23	0,41	-0,24
BIAS	(m ³ /s)	0,77	14,23	5,25	6,31	-1,71	-1,00	2,10	11,24
RMSE	(m ³ /s)	57,45	50,20	17,63	17,20	17,73	12,14	13,36	19,47
MAE	(m ³ /s)	29,11	25,76	8,97	9,78	4,99	3,14	6,36	10,71
R2	(-)	0,83	0,85	0,70	0,82	0,23	0,25	0,45	0,49
Média simulada	(m ³ /s)	87,59	83,37	23,20	26,77	4,73	3,06	10,37	19,21
Média observada	(m ³ /s)	88,54	72,83	19,29	21,75	6,54	4,21	8,54	9,44
Diferença Volume *	%	0,01	0,20	0,27	0,29	-0,26	-0,24	0,25	1,19

* Valores positivos significam que o volume total estimado superou o observado

As bacias de Grão Mogol e V. T. Branca apresentam resultados satisfatórios. Observa-se que para a bacia Rubelita e Ponte Vacaria não foi possível obter uma performance satisfatória. Esta baixa performance pode ser justificada por retiradas de água nestas bacias que não são computadas adequadamente: (a) Os hidrogramas de Rubelita e Ponte Vacaria indicam razoáveis retiradas de água; os dados foram solicitados para a O.N.S (Operador Nacional do Sistema Elétrico) e para HICON Engenharia entretanto não recebemos resposta; (b) no rio Salinas, a montante da estação Rubelita, existe uma barragem de captação de água. O baixo desempenho das bacias de Rubelita e Ponte Vacaria não afetam as vazões afluentes à barragem pois estão a jusante desta, porém a montante da cidade a ser protegida. A influência destas bacias na vazão de cheia do rio Jequitinhonha na cidade a ser protegida é muito pequena, pois estas bacias estão localizadas em região semi-árida enquanto o restante da bacia do Jequitinhonha está numa região mais úmida e, portanto, de maior influência nas vazões.

Não há dados telemétricos disponíveis em período satisfatório para realizar a análise da eficiência dos parâmetros calibrados aplicados na base horária.

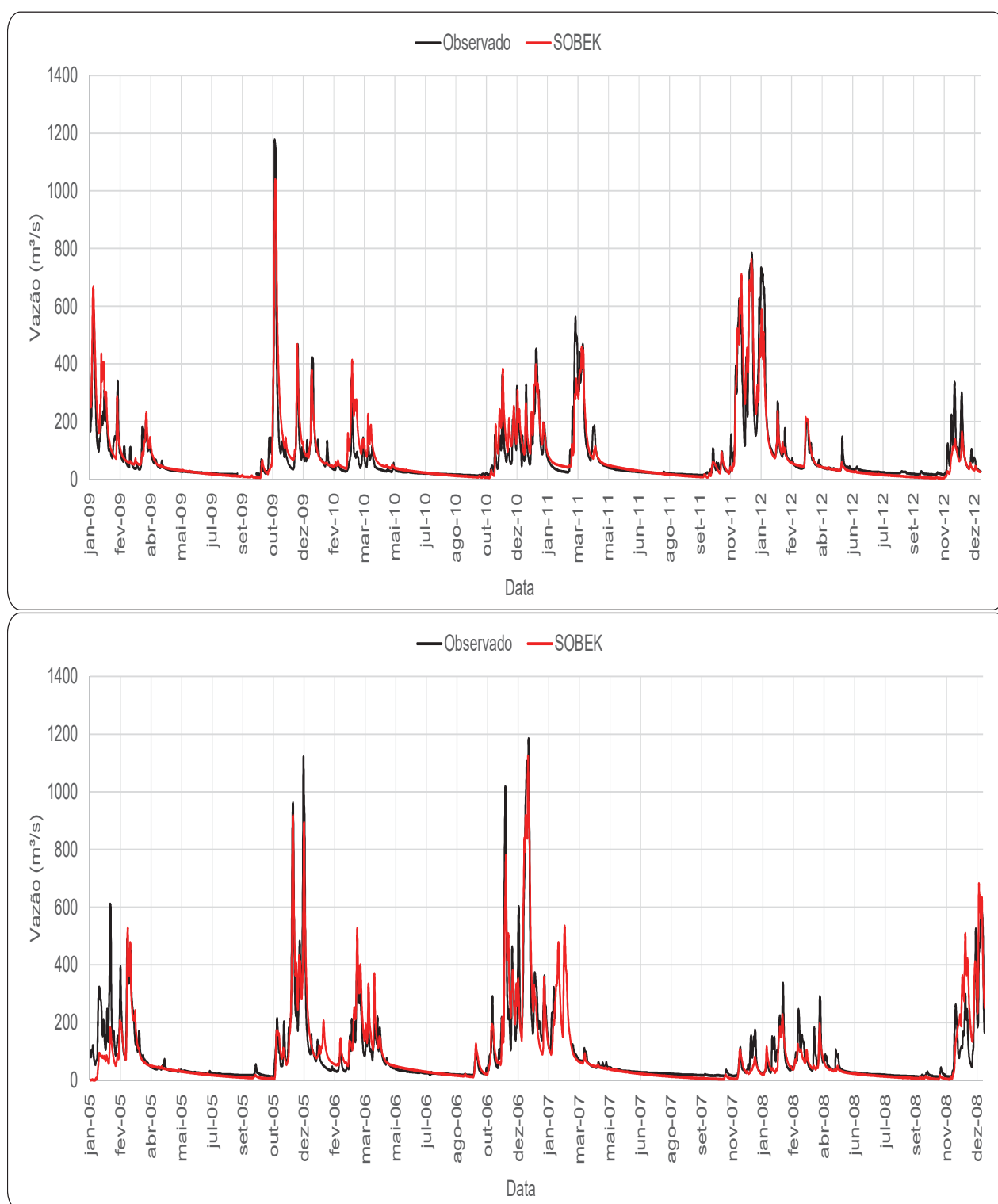


Figura 29 – Hidrogramas observados e simulados em V.T. Branca Jusante no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

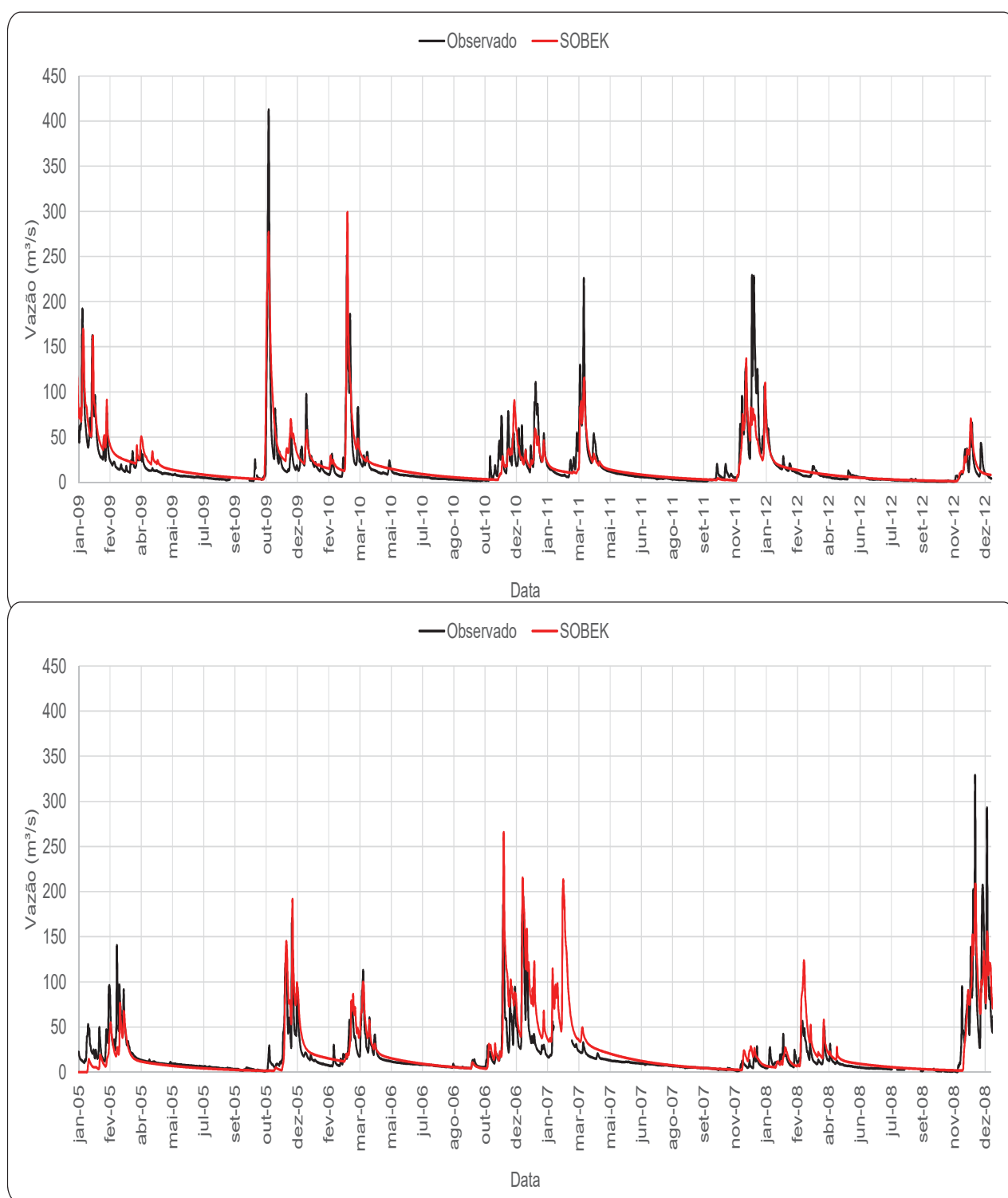


Figura 30 – Hidrogramas observados e simulados em Grão Mogol no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

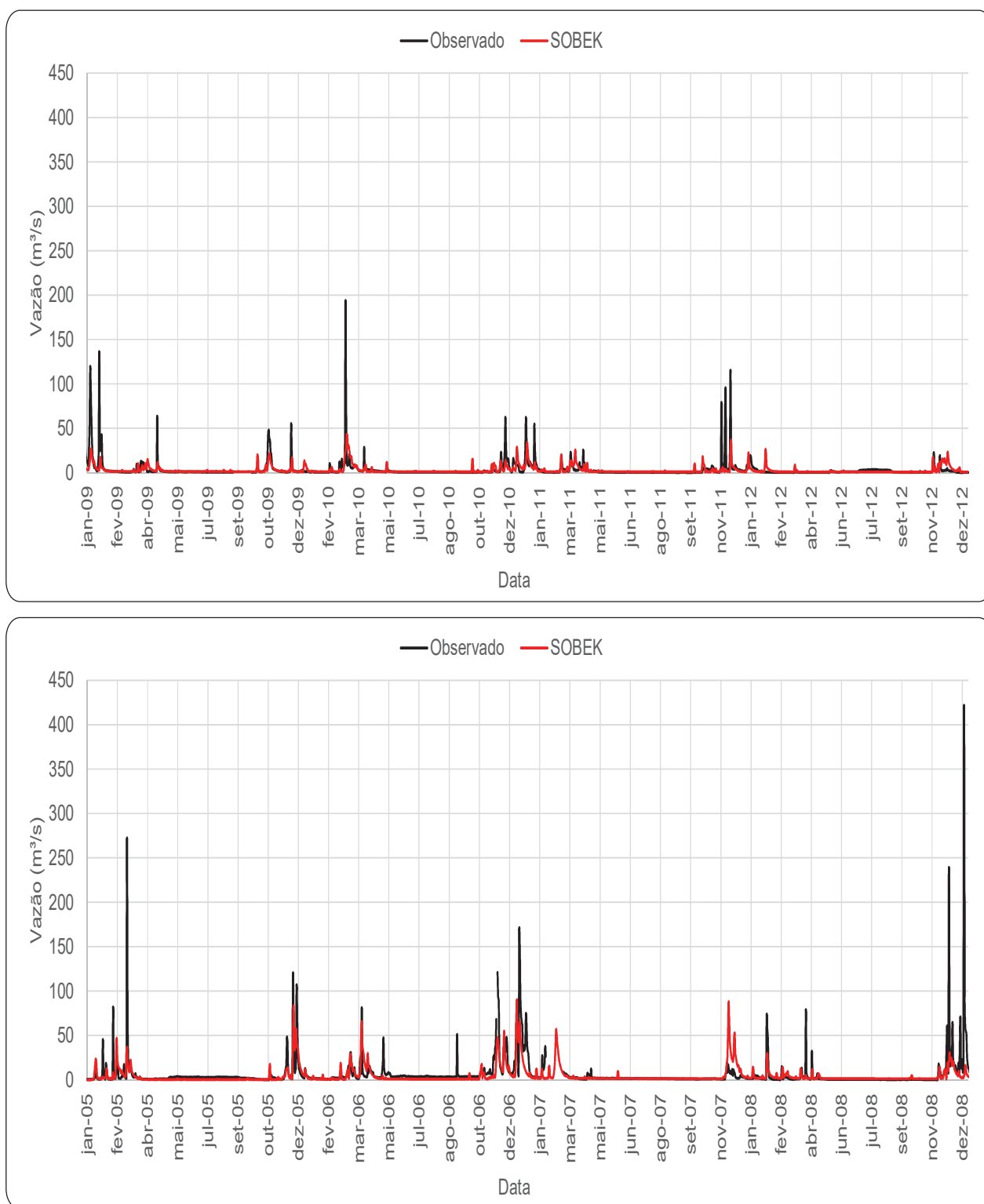


Figura 31 – Hidrogramas observados e simulados em Rubelita no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

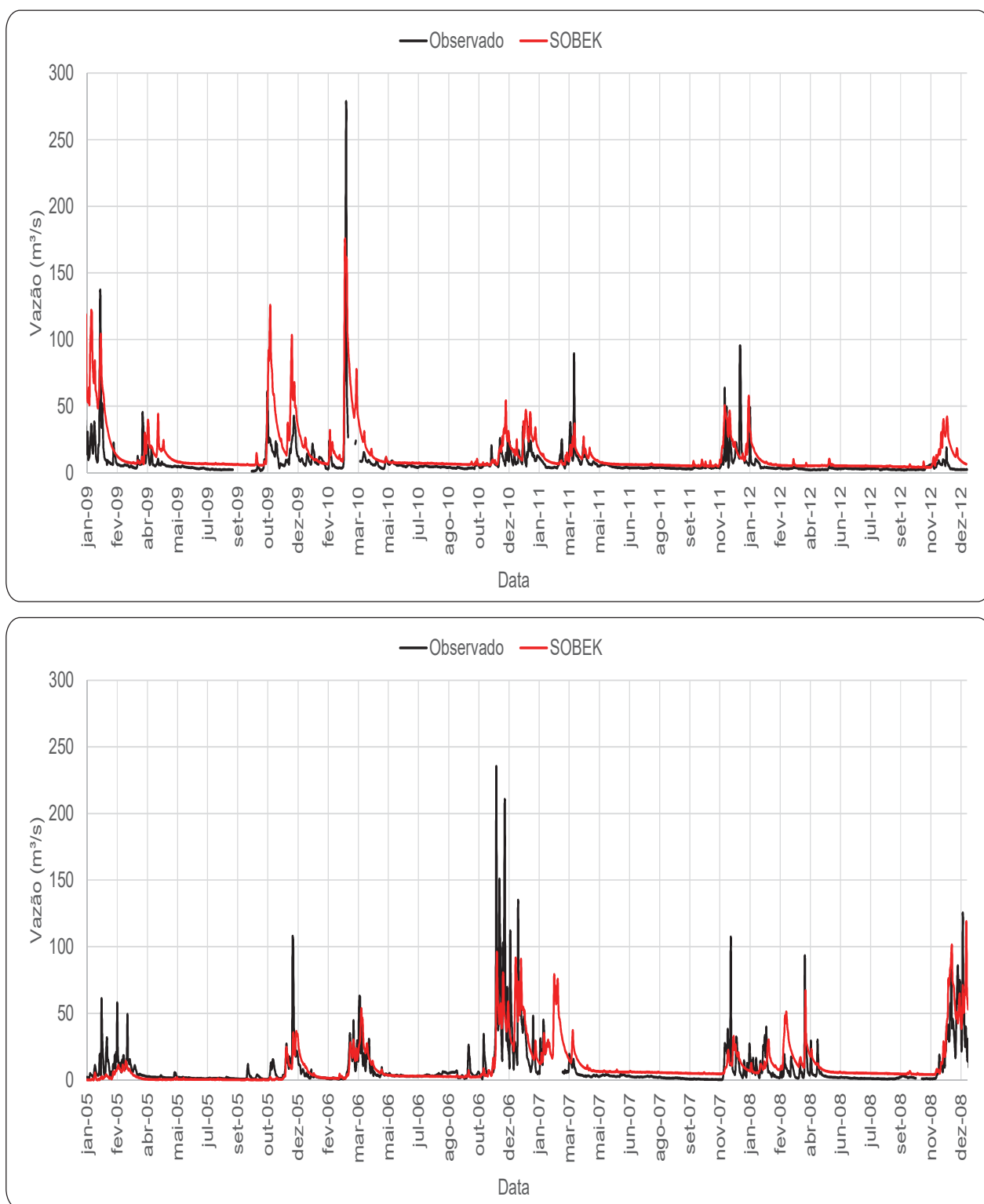


Figura 32 – Hidrogramas observados e simulados em Ponte Vacaria no período de calibração (gráfico superior) e validação (gráfico inferior)

5.2.3 Obtenção do *ensemble* de vazões previstas

Após a calibração do modelo Sacramento (chuva-vazão) utilizando os softwares RRL e Sobek, a etapa seguinte é a geração da previsão hidrológica por conjunto aplicando o *ensemble* de precipitações no modelo chuva-vazão. Esta etapa é realizada pelo software Delft-Fews.

5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

5.3.1 Período escolhido e obtenção dos dados de vazões observadas

Para a aplicação do método proposto escolheu-se um período de cheia dentro do período de dados existentes com discretização horária de vazões afluentes aos reservatórios de Irapé e Rosal. O verão de 2011/2012 abrange a maior cheia deste período disponível (01/07/2011 até 01/08/2014) sem falhas na observação e, portanto, foi escolhido o período de 01 de outubro de 2011 a 29 de fevereiro de 2012 obtidos da média móvel dos dados operativos das barragens.

É sabido que os dados de vazão afluente obtido de dados operativos de usinas hidroelétricas, através de balanço hídrico, apresentam ruídos provindos de imprecisões diversas: a correlação entre energia gerada e vazão turbinada nem sempre é boa, existe imprecisão da curva cota vs volume (uma pequena variação da cota corresponde a grande volume) e existe imprecisão da leitura de cotas. Esta última devido a ventos e ao balanço de massa da água do reservatório. Por isso as vazões afluentes horárias foram obtidas utilizando a média móvel de 11 horas obtendo assim uma série horária suavizada de vazões afluentes aos reservatórios mostradas nas Figura 33 e Figura 34

Foi utilizado, a princípio, o mesmo período para calibração e para a aplicação *online* do método. Entende-se aqui como aplicação *online* aquela em que não se sabe as vazões (ou precipitações) futuras mesmo sendo valores históricos, além do que, a discretização no tempo é pequena (horas). O objetivo de aplicar no mesmo período da calibração é conhecer a real performance do método neste período de calibração, isto porque após a calibração dos parâmetros e o agrupamento dos *ensembles* por ACP os parâmetros realmente utilizados no método não são mais os ótimos e sim uma média do grupo de membro similares do *ensemble*.

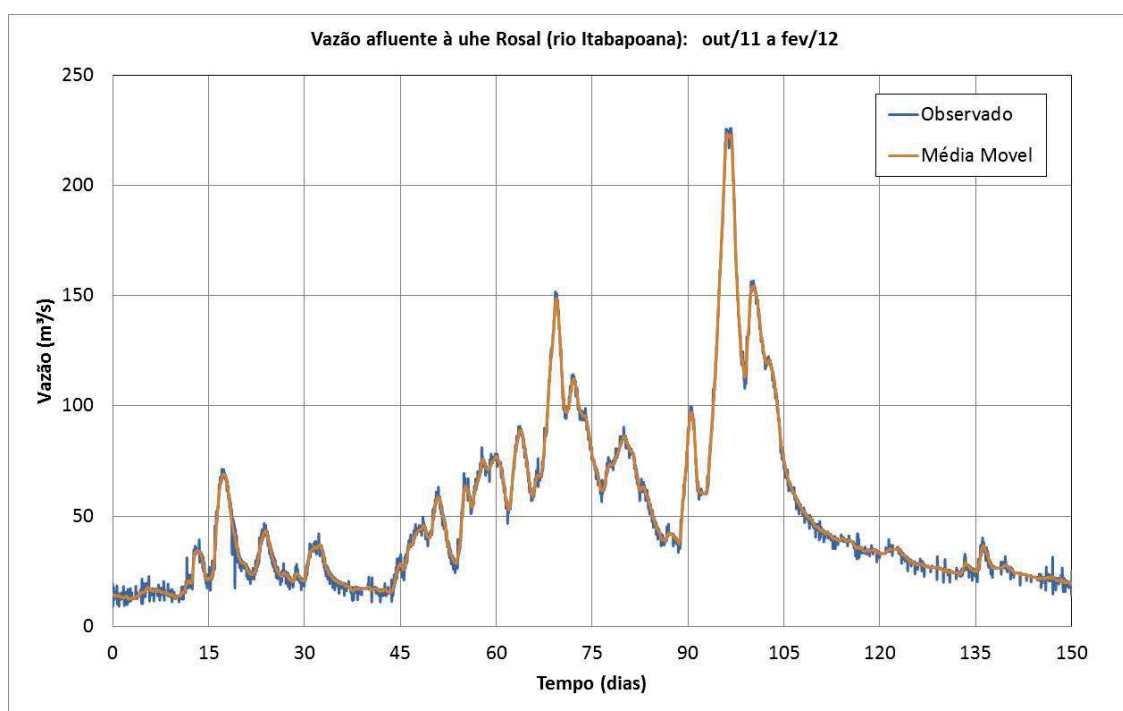


Figura 33 – Vazão observada afluyente à UHE Rosal

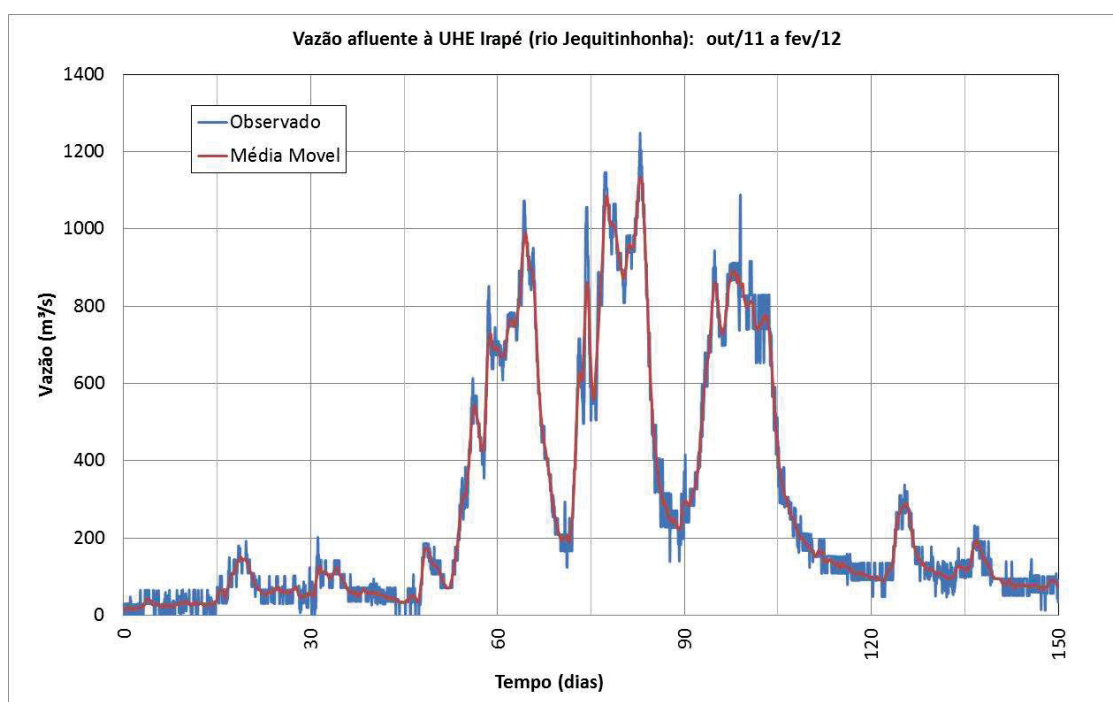


Figura 34 – Vazão observada afluyente à UHE Irapé

5.3.2 Calibração dos parâmetros do método

A calibração do modelo consiste na obtenção dos parâmetros do método (L , a , b). Estes parâmetros são obtidos pela otimização de uma função objetivo. A função objetivo escolhida foi o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), onde os parâmetros (L , a , b) são as variáveis a serem otimizadas de tal modo a que o resultado do método melhor se ajuste às vazões observadas.

Para a calibração dos parâmetros (L , a , b) são utilizadas as vazões (ou precipitações) históricas observadas e as previsões por *ensemble* também históricas. No caso do método de *fuzificação* de vazões estas previsões foram obtidas utilizando os *ensembles* pluviométricos e posterior modelagem chuva-vazão obtendo um *ensemble* de hidrogramas. No caso do método de *fuzificação* da chuva estas previsões são o *ensemble* de precipitações previstas.

O algoritmo para a calibração dos parâmetros, equações (3.1) a (3.16), foi codificado inicialmente na linguagem do MATLAB e posteriormente no Python. O algoritmo inclui a Fuzificação, a Inferência difusa, e a obtenção do hidrograma previsto ou das precipitações previstas conforme a versão escolhida do método e os dados de entrada utilizados (precipitação ou vazão). Além disso, o algoritmo inclui a otimização dos parâmetros L , a , b através da função objetivo NS (equações 3.12 e 3.15) que compara as vazões (ou precipitações) observadas e as obtidas pelo método. Foram utilizados os pacotes de otimização não linear do MATLAB, funções “*fmincon*” e “*globalsearch*” e restrição inferior (parâmetros positivos). No Python foi utilizado o pacote de otimização “L-BFGS-B” descrito em Byrd et al. (1995) e Zhu et al. (1997).

O algoritmo obtém o melhor trio de parâmetros (L , a , b) das funções de pertinência, tal que se obtenha as melhores previsões $VF_{p,t+j}$ equação (3.11) ou $PF_{p,t+j}$, equação (3.14) comparadas com a série histórica utilizada na calibração.

Após a calibração dos parâmetros obtêm-se um trio de parâmetros ótimos para cada data de previsão de vazões. Verificou-se que estes parâmetros variam muito em função do *ensemble* de previsões analisado para sua otimização, isto é, variam em função da data das previsões. Visto isto, surgiu a necessidade de agrupar os *ensembles* previstos em grupos semelhantes através da “Análise dos Componentes Principais” (ACP) com o objetivo de também agrupar *parâmetros* L , a , b mais parecidos. Desta maneira numa nova previsão por *ensemble* basta

verificar a qual grupo esta previsão pertence e utilizar o trio de parâmetros (L , a , b) médios do grupo para a aplicação do método proposto.

5.3.3 Ajuste da precipitação observação ao intervalo de tempo

As precipitações observadas poucas horas após a previsão pluviométrica foram transformadas para uma chuva equivalente de duração de 6 horas com mesmo tempo de recorrência através da fórmula:

$$i = \frac{A Tr^B}{(t+C)^D} \quad (5.8)$$

Onde:

i é a intensidade da chuva (mm/h)

Tr é o tempo de recorrência (anos)

t é a duração da chuva (min)

A , B , C , D são parâmetros da função (Tabela 15).

Os Parâmetros foram obtida de COPASA (2001) da estação pluviométrica de Caparão (código 02041044) para bacia de Itabapoana e da média das estações de V. T. Branca (código 01743002), Mendanha (código 01843003) e Diamantina (código 01843009) obtida de COPASA (2001). A Figura 35 confirma que a utilização da média dos parâmetros destas estações é válida, pois origina uma curva chuva x tempo situada entre as curvas das estações. A Tabela 15 apresenta os parâmetros da equação (5.8):

Tabela 15 - Parâmetros para as equações de chuva intensa

Bacia	Estação	A	B	C	D
Itabapoana	Caparão	1088,097	0140	13,969	0,782
Jequitinhonha	Diamantina	523,600	0,193	5,055	0,637
Jequitinhonha	Mendanha	640,852	0,184	7,150	0,700
Jequitinhonha	V.T.Branca	716,710	0,213	5,250	0,752
Jequitinhonha	Média	627,054	0,197	5,818	0,696

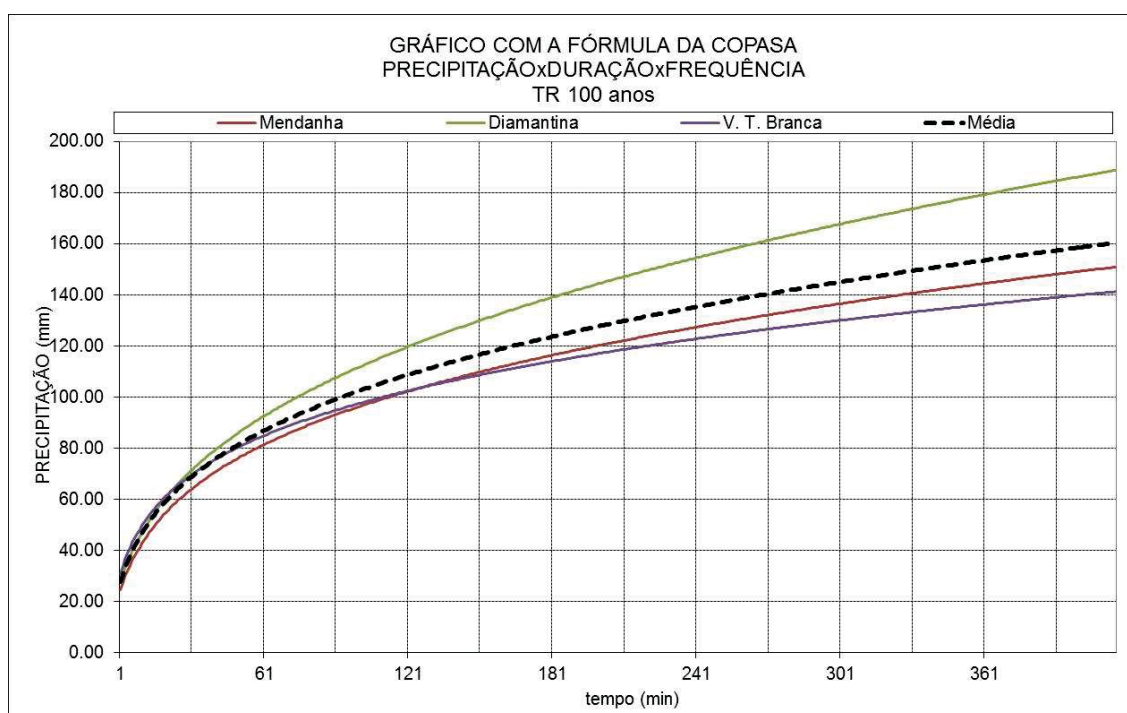


Figura 35 - Gráfico da precipitação em função do tempo de duração da chuva para $Tr = 100$ anos. Obtida da equação de chuvas intensas

6 RESULTADOS

Os resultados foram analisados com base na comparação do índice de Nash-Sutcliffe (NS). Este índice representa a aderência dos dados previstos (pelo método e pela média do *ensemble*) aos dados históricos seja precipitação ou vazão. Também foram utilizados testes de hipóteses em casos de melhoria da média dos NS através de testes estatísticos: teste Z, teste F, teste T, teste χ^2 ou Kolmogorov-Smirnov.

6.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS COM FUZZIFICAÇÃO DAS VAZÕES

O método proposto foi calibrado para os dados históricos de vazões e previsões pluviométricas por *ensemble*. Para cada previsão pluviométrica do período de calibração (01/10/2011 a 29/02/2012) foi aplicado o método proposto e otimizado o trio de parâmetros para melhor ajustar os resultados do método aos dados históricos de vazões observadas. Portanto, na calibração dos parâmetros, para cada data de previsão do passado se obteve um trio de parâmetros.

Da Figura 36 até a Figura 38 apresentam-se a comparação dos índices de Nash-Sutcliffe (NS) obtidos na calibração do método proposto e obtidos pela média dos *ensembles* hidrológicos, utilizando *ensemble* pluviométrico do CPTEC e modelo chuva-vazão Sacramento. Em todas estas figuras o gráfico inferior representa detalhe da região do gráfico nos melhores índices NS. Nestas figuras cada ponto tem as coordenadas correspondendo aos índices NS de uma previsão. Quando os pontos estão sobre a reta vermelha de 45° os dois métodos são similares. Quando o ponto cai na região inferior a esta reta (isto é mais próximo do eixo y) o método proposto é superior à média do *ensemble*. Nestas figuras pode-se observar que o método proposto não melhorou a média dos *ensembles* hidrológicos e pode ser considerado equivalente com a utilização das pertinências gaussianas ou exponenciais e inferior utilizando a pertinência triangular. Isto porque na figura correspondente à pertinência triangular observa-se maior quantidade de pontos acima da reta de 45° o que não ocorreu nas demais figuras. A pertinência triangular tem a desvantagem de que se a vazão observada for longe da prevista de um certo membro do *ensemble* hidrológico o grau de pertinência se torna zero e a vazão

prevista pelo método proposto não tem mais a influência deste membro do *ensemble*. Este fato se mostrou uma desvantagem, por isso a concentração de pontos acima da reta 45° na figura correspondente à pertinência triangular. O fato de um dos membros da previsão por *ensemble* errar nos primeiros instantes não necessariamente errará nos demais, é isso que a figura nos mostra.

A Tabela 16 apresenta os resultados da calibração dos parâmetros mostrando a média e mediana dos índices de NS obtidos pelo método proposto (etapa da calibração) e pela média do *ensemble* hidrológico utilizando o *ensemble* pluviométrico do CPTEC e modelo chuva-vazão Sacramento. Pela Tabela 16 pode-se ver que o método proposto em todos os casos piorou a média e a mediana dos coeficientes de NS.

Tabela 16 – Resultados da calibração dos parâmetros. Comparação do método proposto com a média do *ensemble* do CPTEC, mostrando os coeficientes de Nash-Sutcliffe

Pertinência	Estatística		NS
Triangular	Média	método proposto	-18,8
		<i>ensemble</i> médio	-11,9
	Mediana	método proposto	0,42
		<i>ensemble</i> médio	0,62
		Gráfico*	<i>ensemble</i>
Gaussiana	Média	método proposto	-18,3
		<i>ensemble</i> médio	-11,9
	Mediana	método proposto	0,52
		<i>ensemble</i> médio	0,62
		Gráfico*	equivalente
Exponencial	Média	método proposto	-15,7
		<i>ensemble</i> médio	-11,9
	Mediana	método proposto	0,54
		<i>ensemble</i> médio	0,62
		Gráfico*	equivalente

* percepção gráfica subjetiva de qual o melhor método.
 Mais pontos próximos do eixo x = método melhor
 Mais pontos próximos ao eixo y = média ensemble melhor

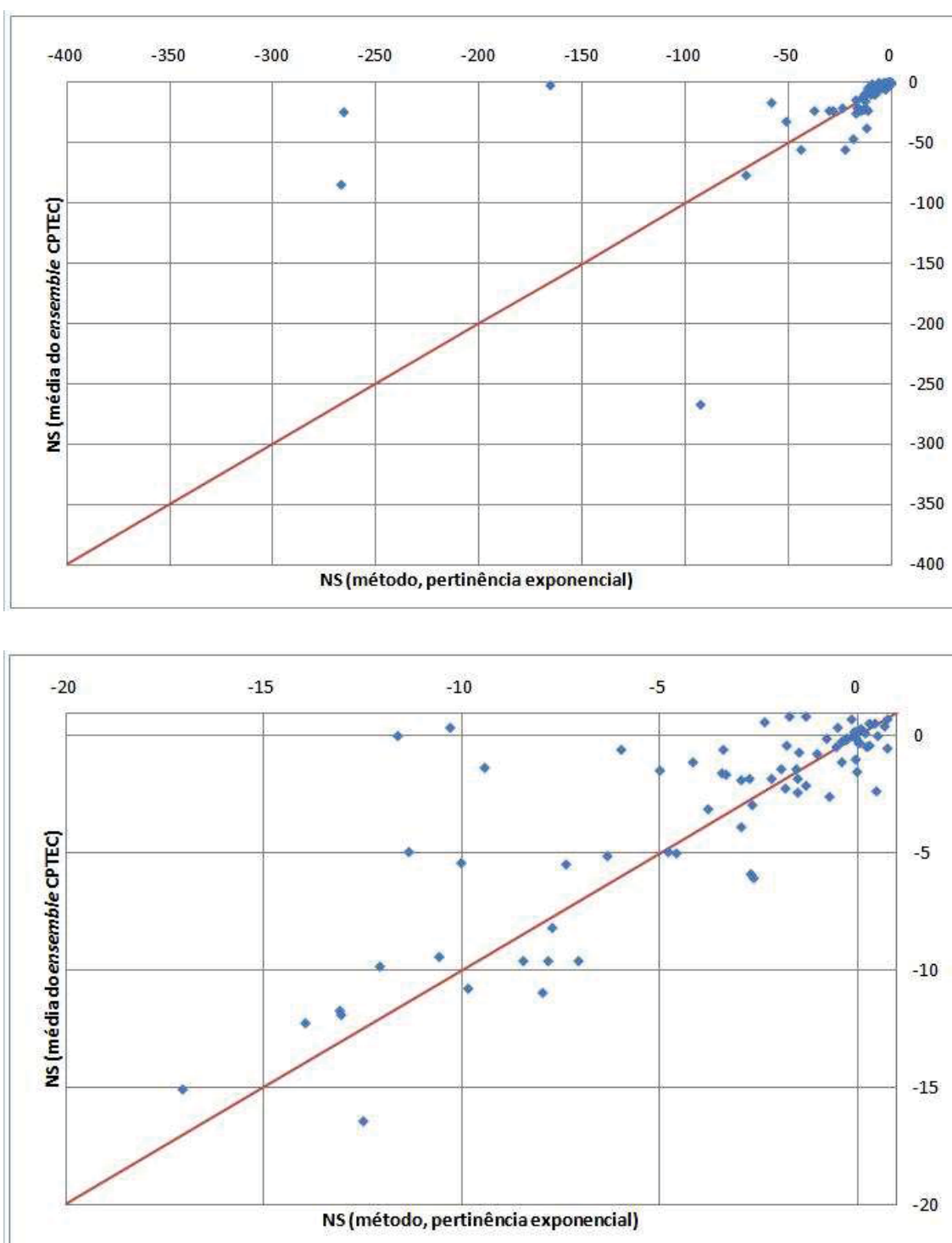


Figura 36 – Comparação entre os índices de NS do método proposto com fuzificação nas vazões (pertinência exponencial) e da média do *ensemble* hidrológico (CPTEC), para vazões na bacia do Itabapoana

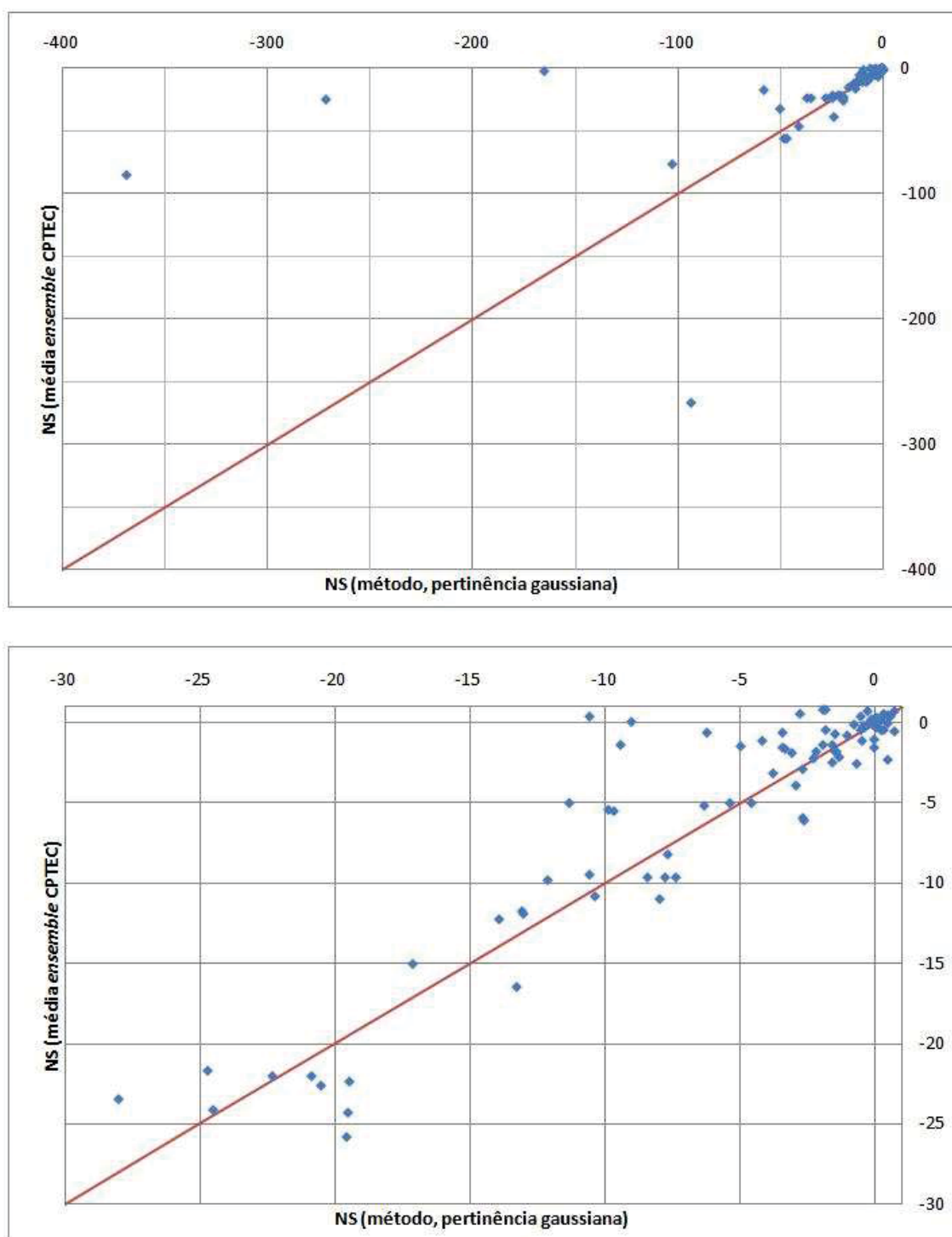


Figura 37 – Comparação entre os índices de NS do método proposto com fuzificação nas vazões (pertinência Gaussiana) e da média do *ensemble* hidrológico (CPTEC), para vazões na bacia do Itabapoana

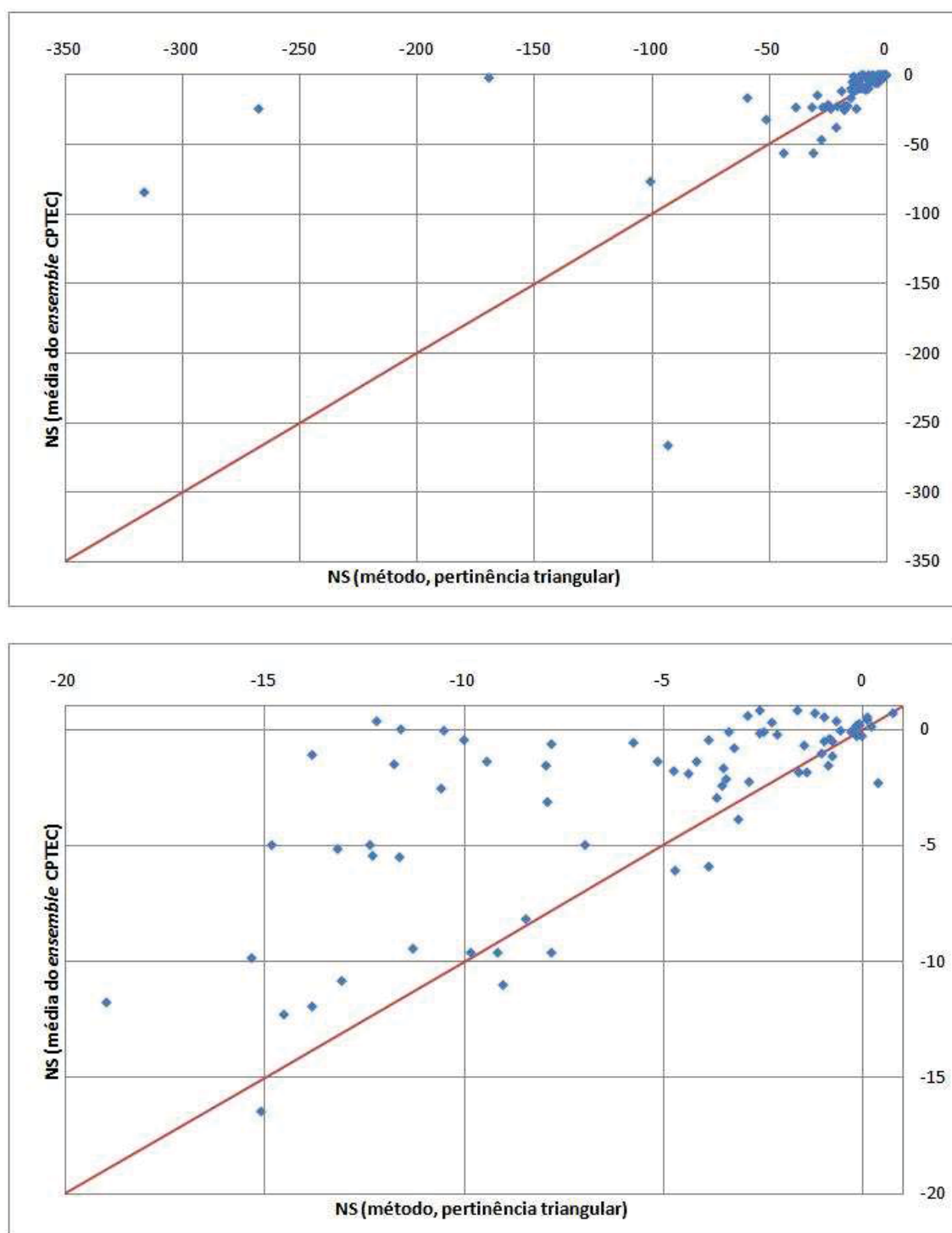


Figura 38 – Comparação entre os índices de NS do método proposto com fuzificação nas vazões (pertinência triangular) e da média do *ensemble* hidrológico (CPTEC), para vazões na bacia do Itabapoana

6.2 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS COM FUZZIFICAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES

6.2.1 Precipitações acumuladas diárias

A calibração compreendeu em aplicar o método proposto em cada previsão histórica, otimizando o trio de parâmetros para que melhor ajustar os resultados do método aos dados históricos de precipitação. Portanto, para cada data de previsão do passado se obteve um trio de parâmetros.

A Tabela 17 (bacia do rio Itabapoana) e Tabela 18 (bacia do rio Jequitinhonha) apresentam os resultados da calibração dos parâmetros mostrando a média e mediana dos índices de Nash-Sutcliffe (NS) obtidos pelo método proposto e pela média do *ensemble* pluviométrico. Pelas tabelas pode-se ver que o método proposto (na fase da calibração dos parâmetros) somente melhorou a mediana e a média dos coeficientes de NS nos seguintes casos, na bacia do Jequitinhonha: pertinência exponencial com *ensemble* pluviométrico do CPTEC ou GEFS e pertinência triangular na utilização do *ensemble* pluviométrico do CPTEC; e na bacia do Itabapoana: pertinência exponencial com *ensemble* CPTEC.

Para confirmar que o desempenho do método é superior quando a mediana e a média são melhores aplicou-se testes de aderência χ^2 e Kolmogorov-Smirnov com o coeficiente de significância de 5%. Nestes testes verificou-se se a série de coeficientes de NS do método proposto pode ser considerada estatisticamente igual a série de coeficientes de NS da média do *ensemble*. Estes testes atestam que as duas séries de coeficientes (para os casos testados) não podem ser consideradas iguais. Portanto atesta que o método proposto (na fase de calibração dos parâmetros) é superior, isto é, com média e mediana dos índices de NS melhores.

Da Figura 39 até a Figura 41 apresenta-se a comparação dos índices de Nash-Sutcliffe (NS) obtidos na calibração do método proposto (fuzzificando as chuvas diárias) e obtidos pela média do *ensemble* pluviométrico para a bacia do rio Itabapoana e da Figura 42 até a Figura 44 os mesmos índices para a bacia do Jequitinhonha. No Apêndice A é apresentado todas as demais figuras variando a função de pertinência e a previsão pluviométrica por *ensemble* utilizadas. Nestas figuras o gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

Na Figura 39 pode-se ver claramente a inferioridade do método proposto para o caso ilustrado, isto porque a maioria dos pontos caíram mais próximos do eixo horizontal (acima da linha de 45°) e na Figura 40 observa-se a superioridade do método proposto (a maioria dos pontos estão abaixo da linha de 45°). Na Figura 41 (gráfico superior) mostra que o método melhorou as piores previsões ($NS < -20$), entretanto isso não ocorreu para previsões que já tinham NS melhores ($NS > -10$) conforme a mesma figura (gráfico inferior).

Na Figura 42 pode-se ver que o método proposto é melhor que a média dos ensembles do CPTEC para o rio Jequitinhonha, pois a maioria dos pontos ficaram abaixo da reta de 45°.

Na Figura 43 (gráfico superior) pode-se ver que o método melhorou as piores previsões ($NS < -500$), ficando equivalente à média do ensemble para previsões com $NS > -10$ (gráfico inferior). Na Figura 44 (gráfico superior) pode-se ver que o método melhorou as piores previsões ($NS < -100$) entretanto no gráfico inferior da mesma figura fica clara a inferioridade no método proposto para previsões melhores ($NS > -10$).

Tabela 17 – Desempenho comparativo (pelo NS) entre o método proposto e a média dos *ensembles* (precipitação acumulada diária) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Itabapoana

		Estatísticas			
Pertinência	a		CPTEC	GEFS	ECMWF
Triangular	Média	método proposto	-77	-17	-221
		média do <i>ensemble</i>	-93	-18	-212
	Mediana	método proposto	-1,08	0,06	0,25
		média do <i>ensemble</i>	-0,78	0,31	0,45
		Gráfico*°	equivalente	equivalente	<i>ensemble</i>
Gaussiana	Média	método proposto	-7589	-359694	-57
		média do <i>ensemble</i>	-1116	-54	-8
	Mediana	método proposto	-2,35	0,33	0,26
		média do <i>ensemble</i>	-0,96	0,46	0,56
		Gráfico*°	<i>ensemble</i>	<i>ensemble</i>	<i>ensemble</i>
Exponencial	Média	método proposto	-691	-30,94	-29,7
		média do <i>ensemble</i>	-963	-59,48	-199,4
	Mediana	método proposto	-0,67	0,19	0,34
		média do <i>ensemble</i>	-0,90	0,31	0,51
		Gráfico*°	método	equivalente	<i>ensemble</i>

*° percepção gráfica subjetiva de qual o melhor método, confirmado por testes estatísticos.

Tabela 18 - Desempenho comparativo (pelo NS) entre o método proposto e a média dos *ensembles* (precipitação acumulada diária) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Jequitinhonha

Pertinência	Estatística		CPTEC	GEFS	ECMWF
Triangular	Média	método proposto	-532	-34	-13
		média do <i>ensemble</i>	-1646	-64	-30
	Mediana	método proposto	-2,46	-0,21	0,28
		média do <i>ensemble</i>	-2,67	-0,07	0,40
	Gráfico		método	equivalente	equivalente
Gaussiana	Média	método proposto	-2662	-171	-63
		média do <i>ensemble</i>	-1745	-69	-30
	Mediana	método proposto	-5,56	-0,50	0,10
		média do <i>ensemble</i>	-3,14	0,00	0,41
	Gráfico		<i>ensemble</i>	<i>Ensemble</i>	<i>ensemble</i>
Exponencial	Média	método proposto	-162	-18	-5
		média do média do <i>ensemble</i>	-1609	-62	-28
	Mediana	método proposto	-1,40	0,00	0,25
		<i>ensemble</i>	-2,36	0,00	0,38
	Gráfico*		método	método	equivalente

* percepção gráfica subjetiva de qual o melhor método, confirmado por testes estatísticos

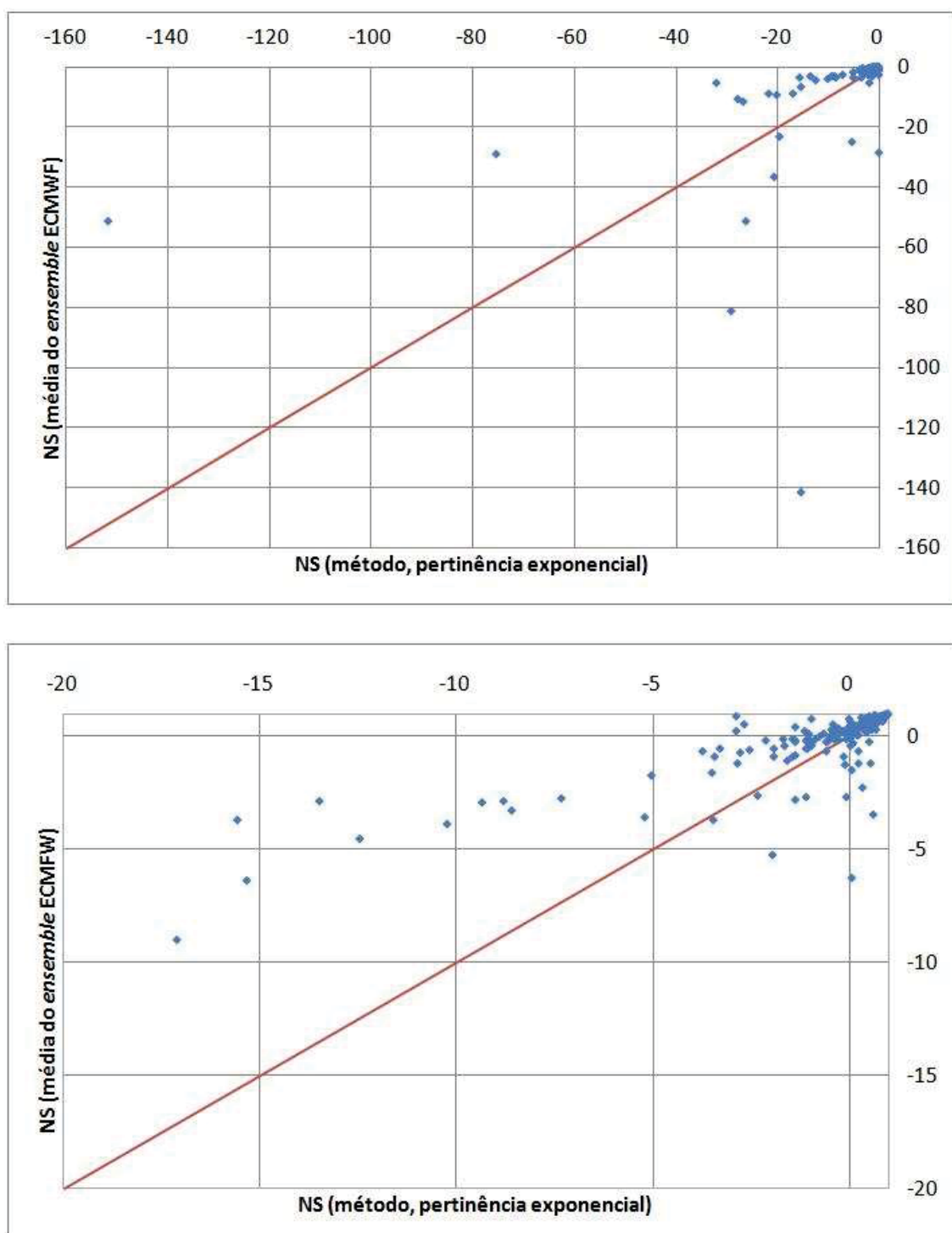


Figura 39 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando as Chuvas diárias (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF) para a bacia do Itabapoana

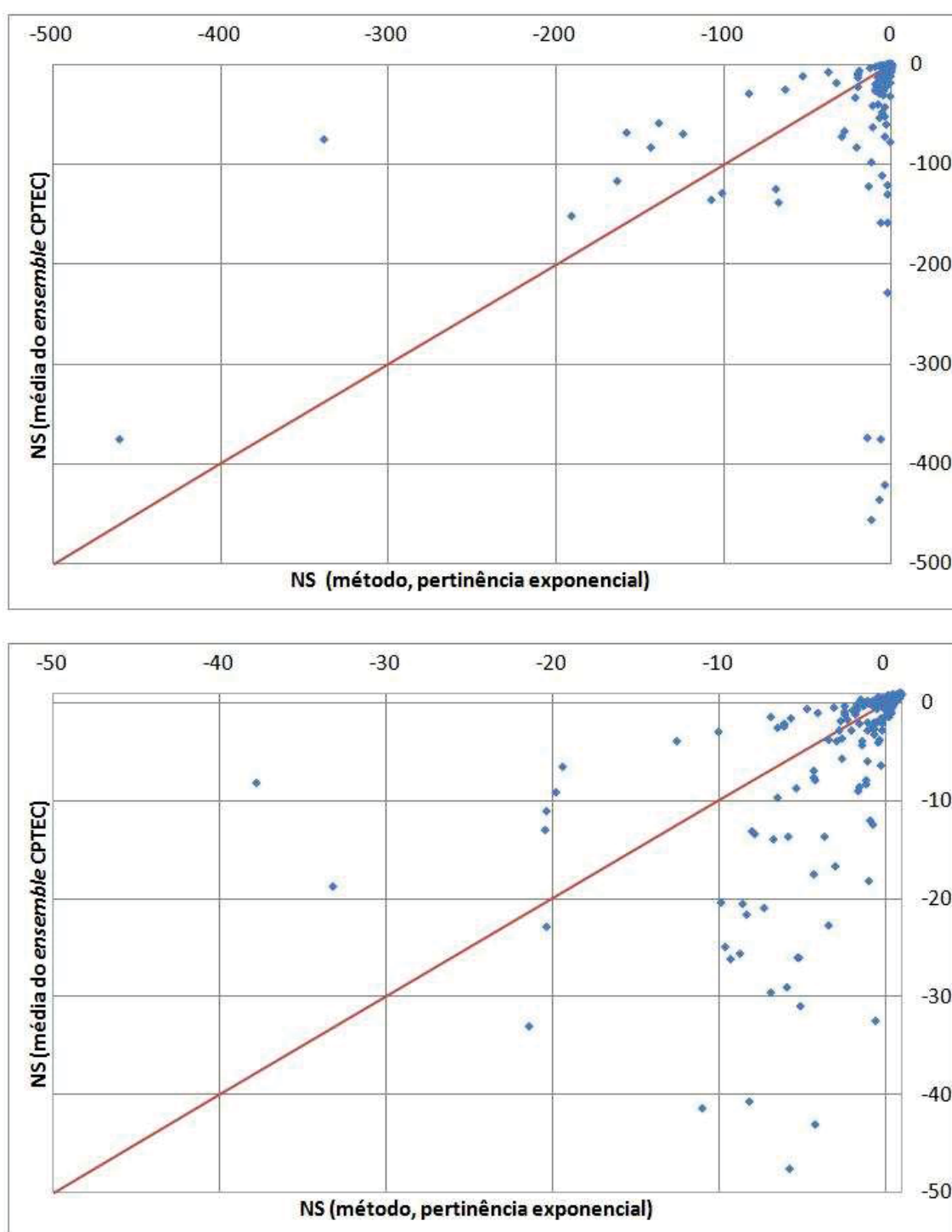


Figura 40 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando chuva diária (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC) para a bacia do Itabapoana

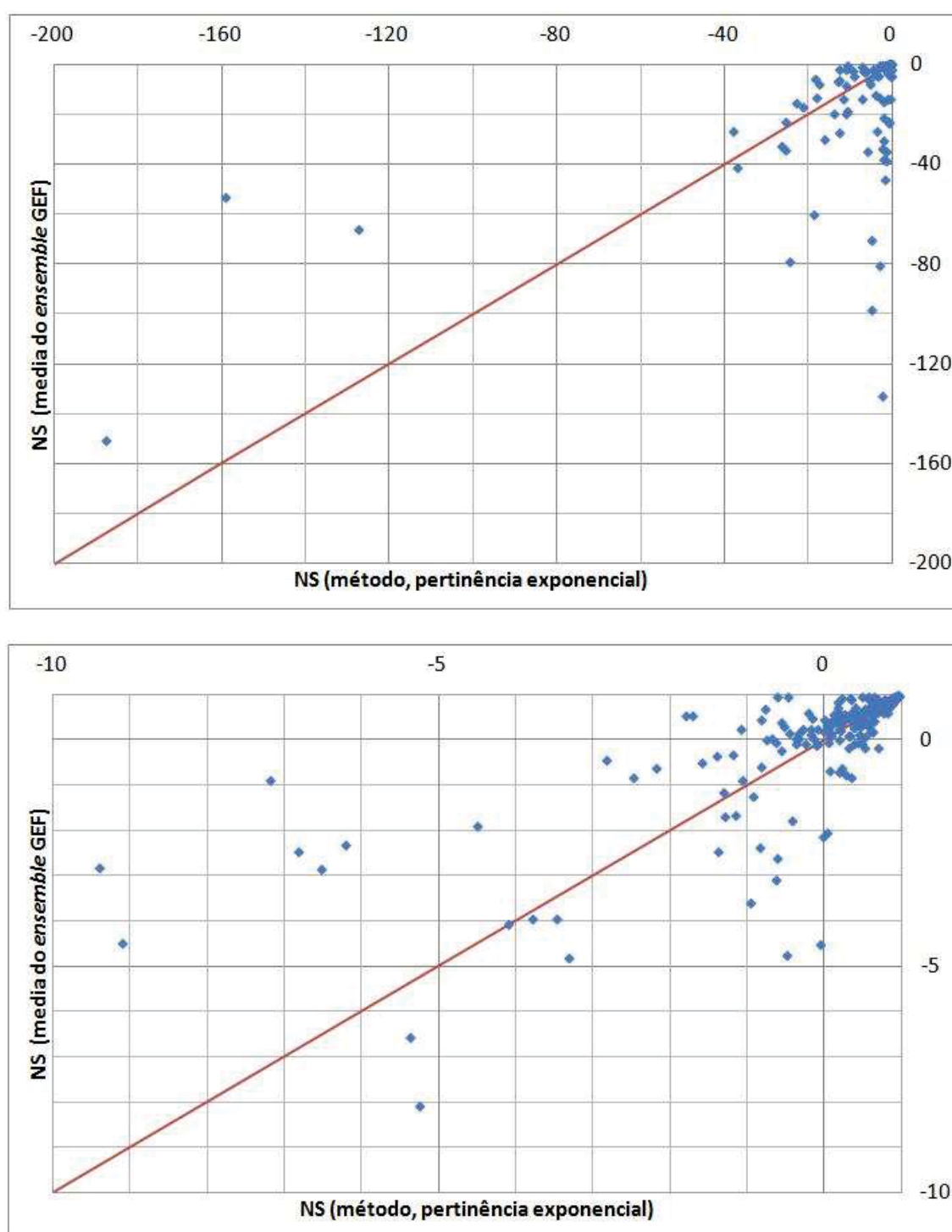


Figura 41 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS) para chuva diária e bacia do Itabapoana

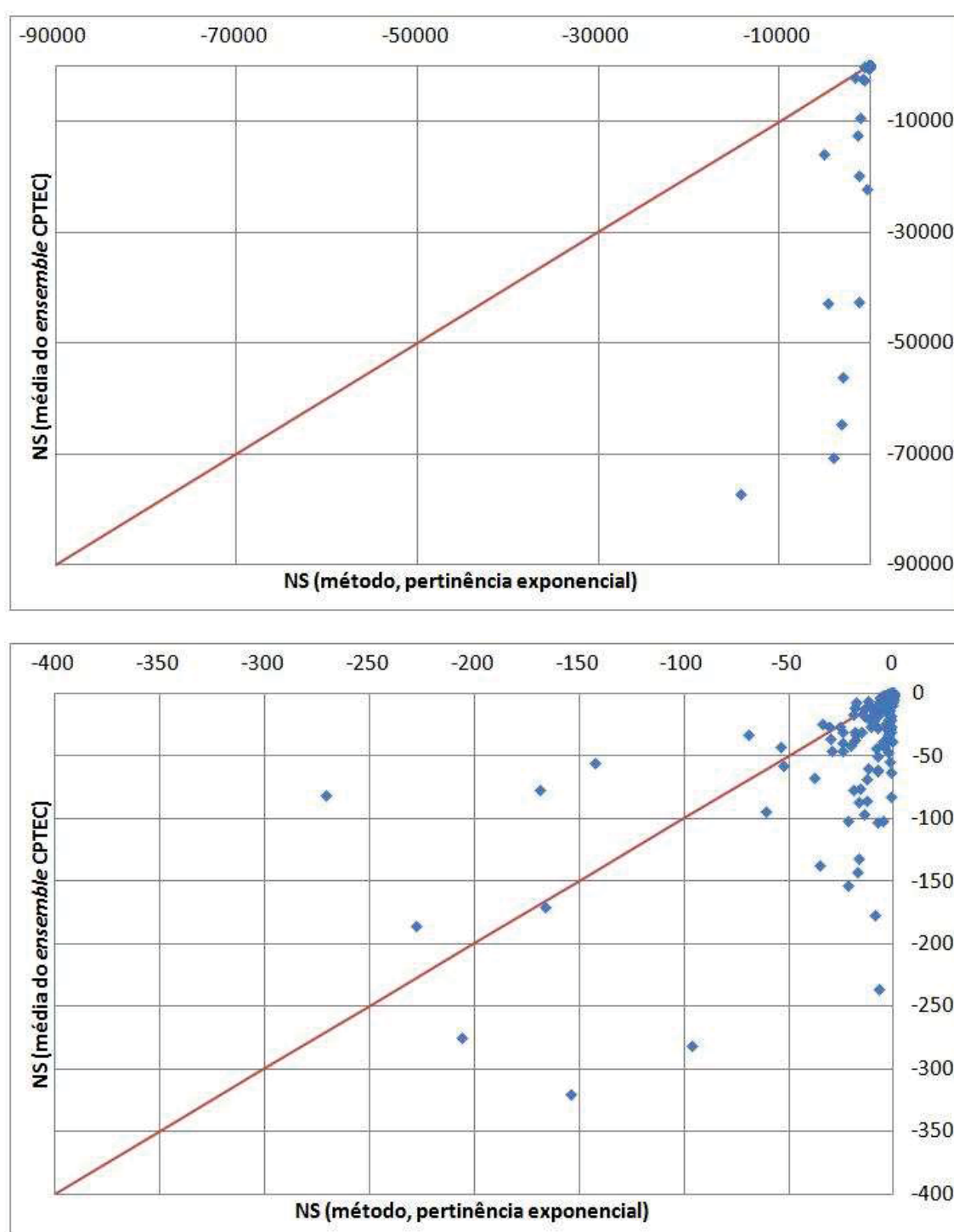


Figura 42 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzificando a chuva diária (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC), para a bacia do Jequitinhonha

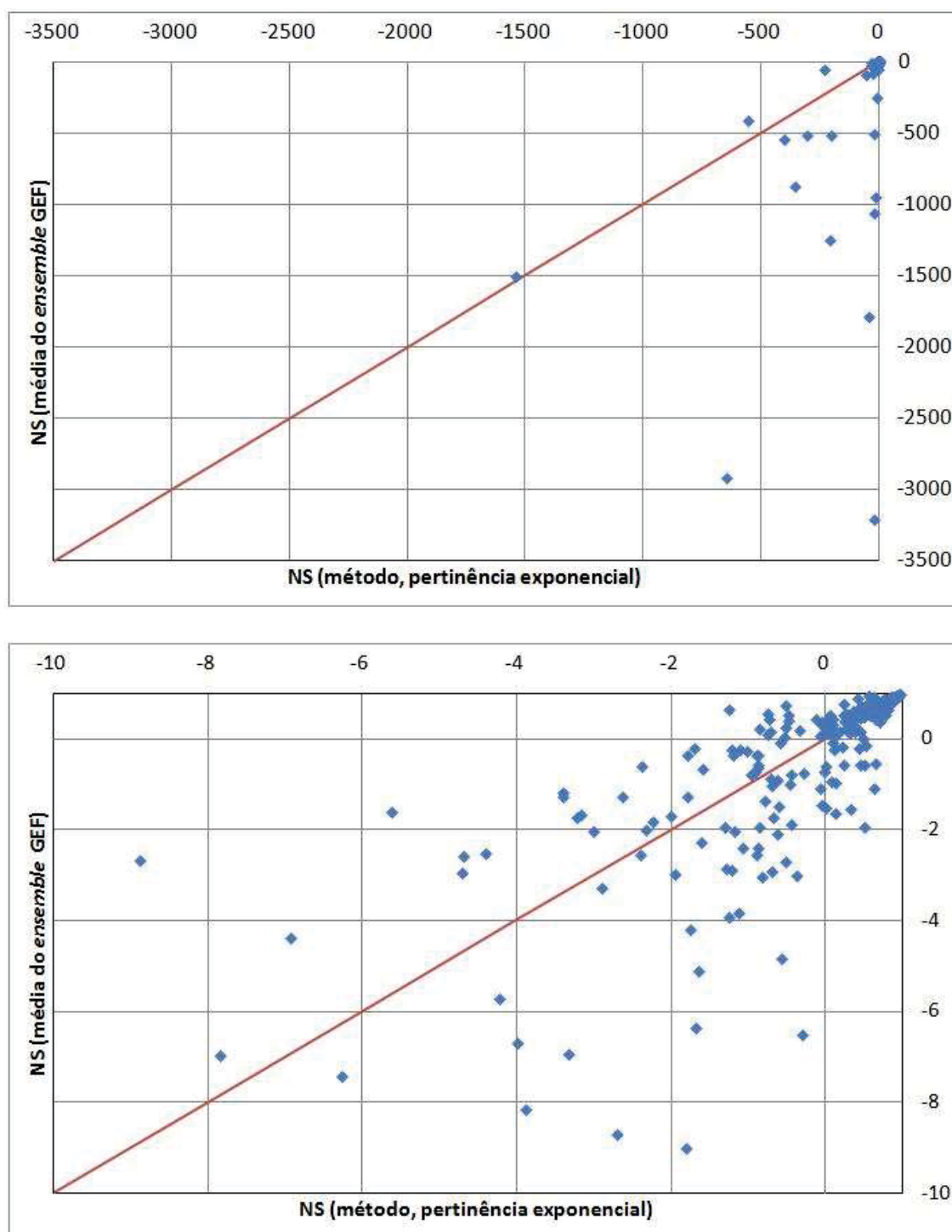


Figura 43 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando a chuva diária (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS), para a bacia do Jequitinhonha

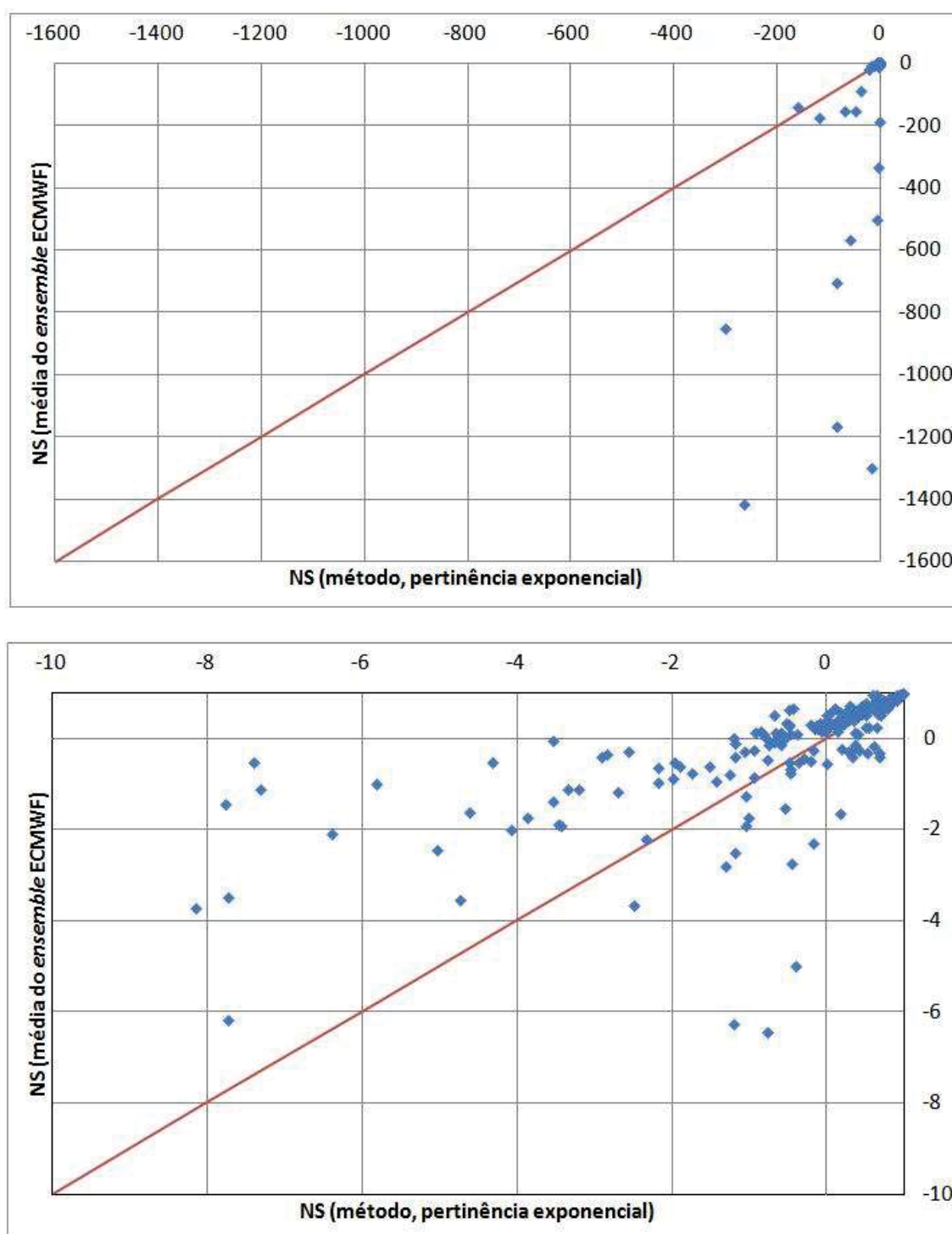


Figura 44 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF), chuva diária e bacia do Jequitinhonha

6.2.2 Precipitações acumuladas a cada 6 horas

Para cada previsão pluviométrica histórica foi aplicado o método proposto para chuvas acumuladas a cada 6 horas e otimizado o trio de parâmetros para melhor ajustar os resultados do método aos dados históricos de precipitação. Portanto cada data de previsão do passado se obteve um trio de parâmetros.

A Tabela 19 (bacia do rio Itabapoana) e Tabela 20 (bacia do rio Jequitinhonha) apresentam os resultados da performance do modelo na calibração dos parâmetros mostrando a média e mediana dos índices de Nash-Sutcliffe obtidos pelo método proposto e pela média os *ensembles* pluviométricos. Pelas tabelas pode-se ver que o método proposto (na fase da calibração dos parâmetros) melhorou a mediana e a média dos coeficientes de Nash-Sutcliffe quando utilizado pertinência exponencial seja qual for o *ensemble* utilizado para ambas as bacias hidrográficas e utilizando pertinência triangular para a bacia do Jequitinhonha.

Para confirmar matematicamente esta afirmação aplicou-se testes de aderência χ^2 e Kolmogorov-Smirnov com o coeficiente de significância de 5%. Nestes testes verificam se a série de coeficientes de NS do método proposto pode ser considerada estatisticamente igual a série de coeficiente de NS da média do *ensemble*. Estes testes atestam que as duas séries de coeficientes não podem ser consideradas iguais. Portanto atesta que o método proposto é superior nestes casos onde a média e mediano foram melhores.

As Figura 45 até Figura 47 apresentam a comparação dos índices de Nash-Sutcliffe obtidos na calibração do método proposto fuzificando as chuvas de 6 horas e obtidos pela média do *ensemble* pluviométrico para a bacia do rio Itabapoana e entre a Figura 48 e Figura 50 apresenta os mesmos índices para a bacia do Jequitinhonha. Nestas figuras pode-se observar que o método proposto (na fase de calibração) obteve desempenho melhor que a média do *ensemble* pluviométricos quando se utiliza a pertinência exponencial com qualquer ensemble, entretanto principalmente nos *ensembles* do CPTEC ou GEFS, para ambas as bacias hidrográficas. Isto porque os pontos nos gráficos das figuras estão na sua maioria mais próximos do eixo vertical (isto é, abaixo da linha de 45°).

No Apêndice A é apresentado todas as demais figuras variando a função de pertinência e a previsão pluviométrica por *ensemble* utilizadas. Nestas figuras o gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

Tabela 19 – Desempenho comparativo entre o método proposto e a média do *ensemble* (precipitação acumulada de 6 horas) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Itabapoana

Pertinência	Estatística		CPTEC	GEFS	ECMWF
Triangular	Média	método proposto	-268378	-164444	-141761
		média do <i>ensemble</i>	-142534	-58855	-32474
	Mediana	método proposto	-89,4	-44,2	-21,5
		média do <i>ensemble</i>	-108,1	-39,8	-24,3
	Gráfico*°		equivalentes	<i>ensemble</i>	equivalente
Gaussiana	Média	método proposto	-484552	-351468	-242465
		média do <i>ensemble</i>	-123392	-66039	-36511
	Mediana	método proposto	-166,2	-94,6	-44,7
		média do <i>ensemble</i>	-101,3	-63,9	-25,3
	Gráfico*°		<i>ensemble</i>	ensemble	<i>ensemble</i>
Exponencial	Média	método proposto	-33539	-28135	-22271
		média do <i>ensemble</i>	-99238	-50177	-28428
	Mediana	método proposto	-24,7	-15,8	-12,6
		<i>média do ensemble</i>	-74,0	-34,2	-16,5
	Gráfico*°		método	método	método

*° percepção gráfica subjetiva de qual o melhor método

Tabela 20 – Desempenho comparativo entre o método proposto e a média do *ensemble* (precipitação acumulada de 6 horas) mostrando a estatística do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Bacia do Jequitinhonha

Pertinência	Estatística		CPTEC	GEFS	ECMWF
Triangular	Média	método proposto	-6500740	-1723790	-157512
		média do <i>ensemble</i>	-14529100	-3674305	-195236
	Mediana	método proposto	-36,0	-20,9	-5,4
		média do <i>ensemble</i>	-61,5	-27,4	-11,4
	Melhor	Gráfico	equivalentes	equivalentes	<i>ensemble</i>
Gaussiana	Média	método proposto	-17920554	-4844358	-126391
		média do <i>ensemble</i>	-14091421	-3672622	-94716
	Mediana	método proposto	-95,7	-48,8	-11,0
		média do <i>ensemble</i>	-61,1	-27,8	-6,4
	Melhor	Gráfico	<i>ensemble</i>	<i>ensemble</i>	<i>ensemble</i>
Exponencial	Média	método proposto	-3460019	-567395	-39421
		média do <i>ensemble</i>	-14376893	-3467882	-99849
	Mediana	método proposto	-14,5	-6,6	-1,2
		média do <i>ensemble</i>	-61,6	-26,0	-4,2
	Melhor	Gráfico	método	método	equivalente

Na linha Gráfico é mostrado a percepção gráfica subjetiva de qual o melhor método

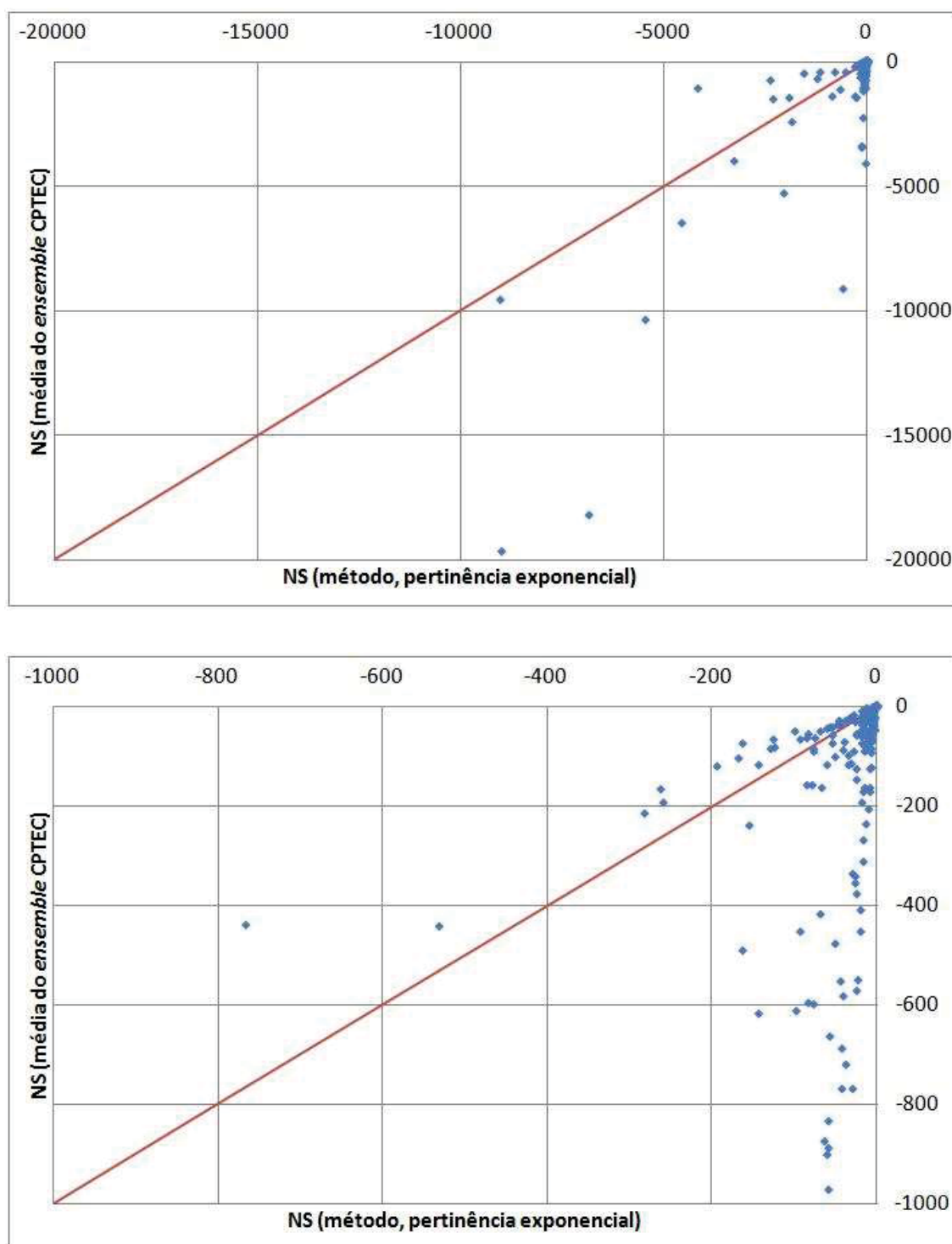


Figura 45 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando chuvas de 6 horas (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC): Bacia do Itabapoana

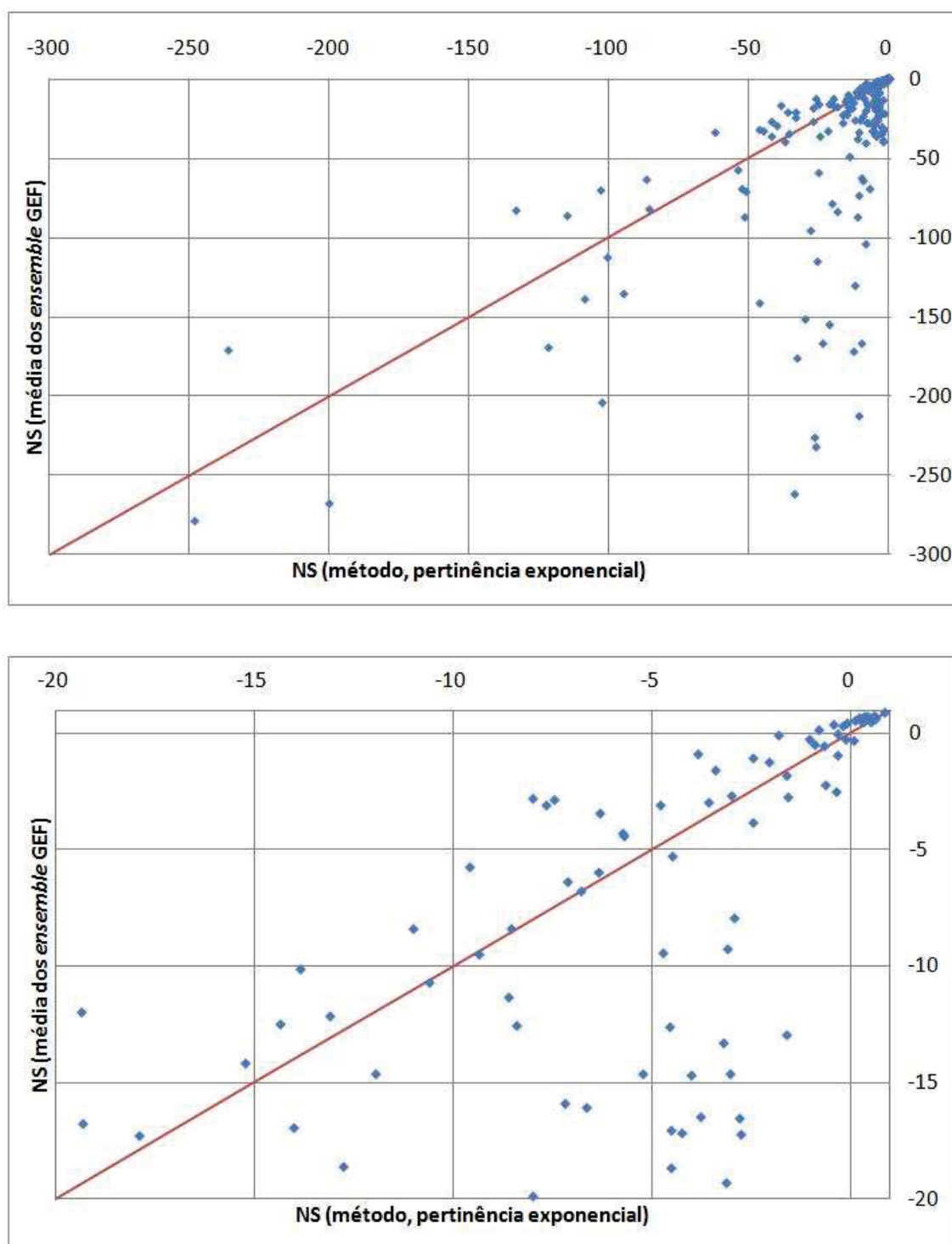


Figura 46 – Comparação entre os índices de NS do método proposto fuzzificando chuvas de 6 horas (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS): Bacia do Itabapoana

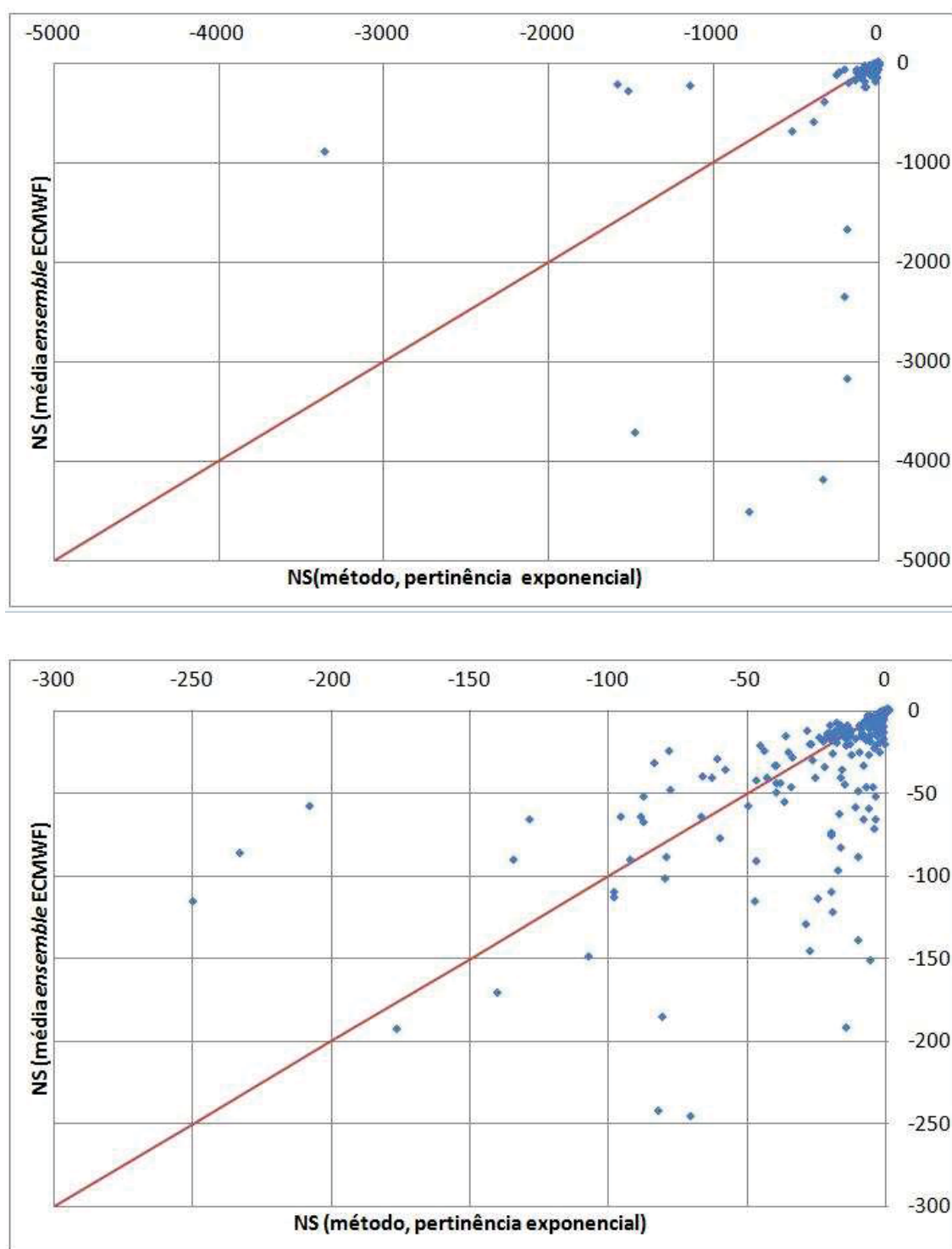


Figura 47 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF). Bacia do Itabapoana, chuva acumulada de 6 horas

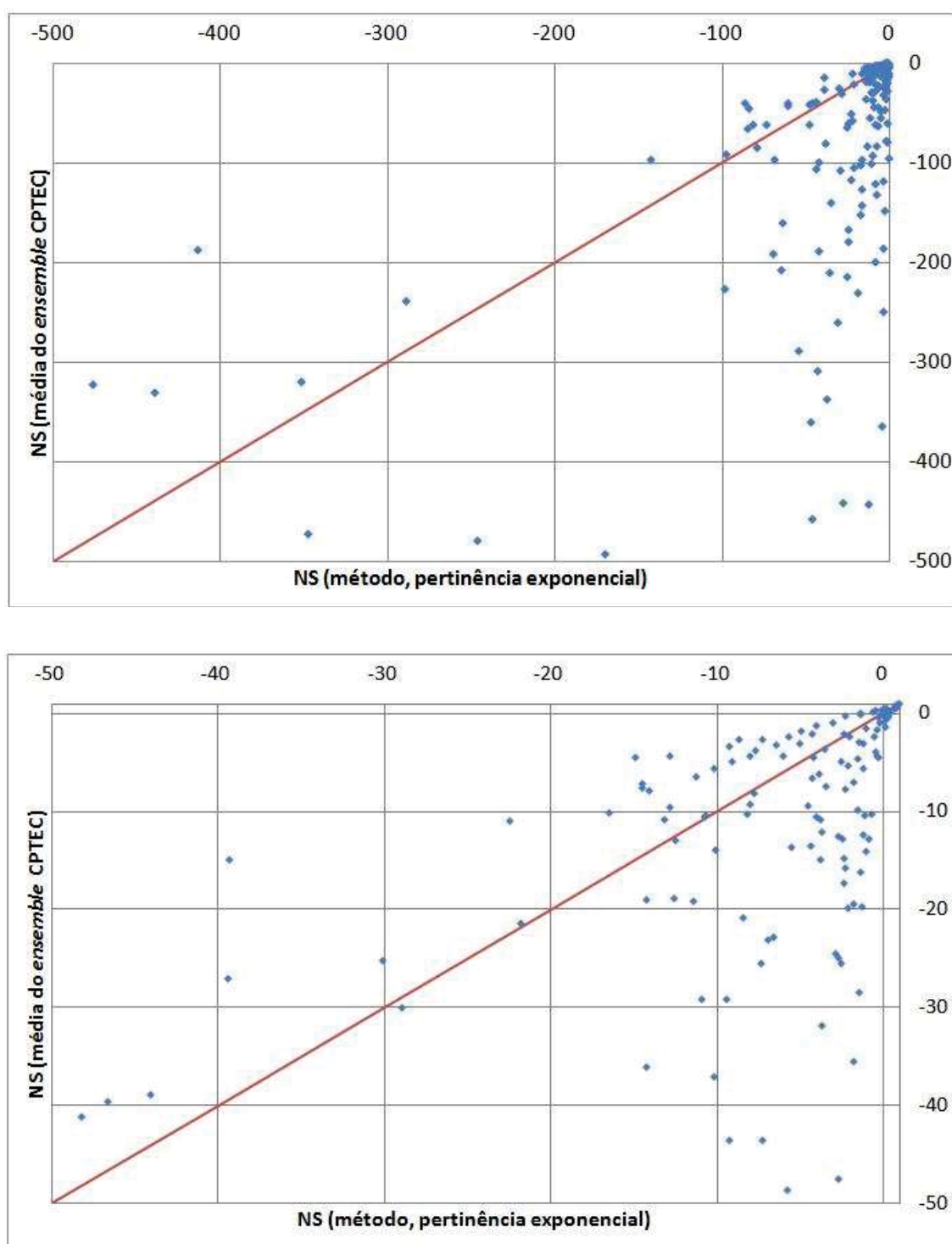


Figura 48 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC): Bacia do Jequitinhonha

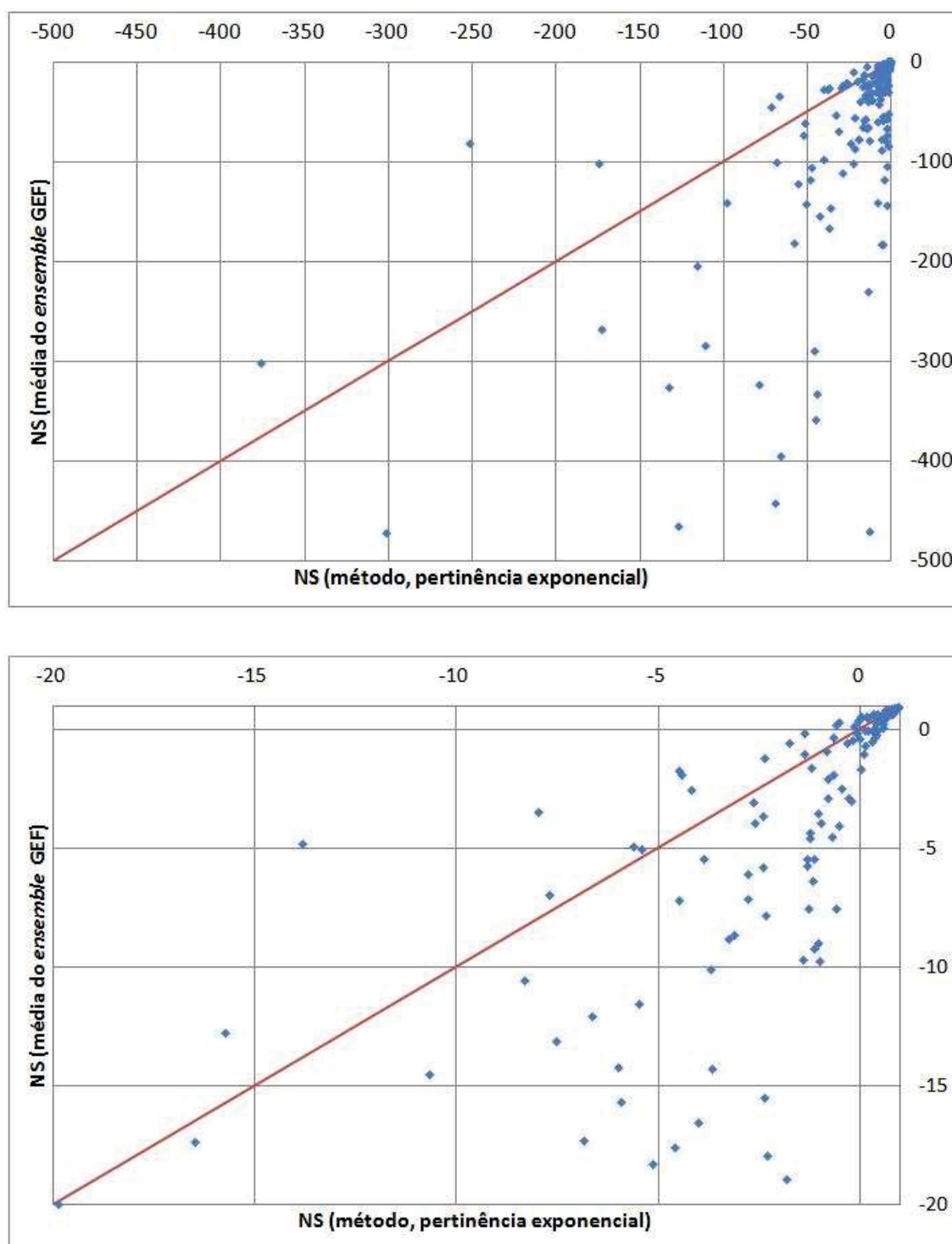


Figura 49 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS): Bacia do Jequitinhonha

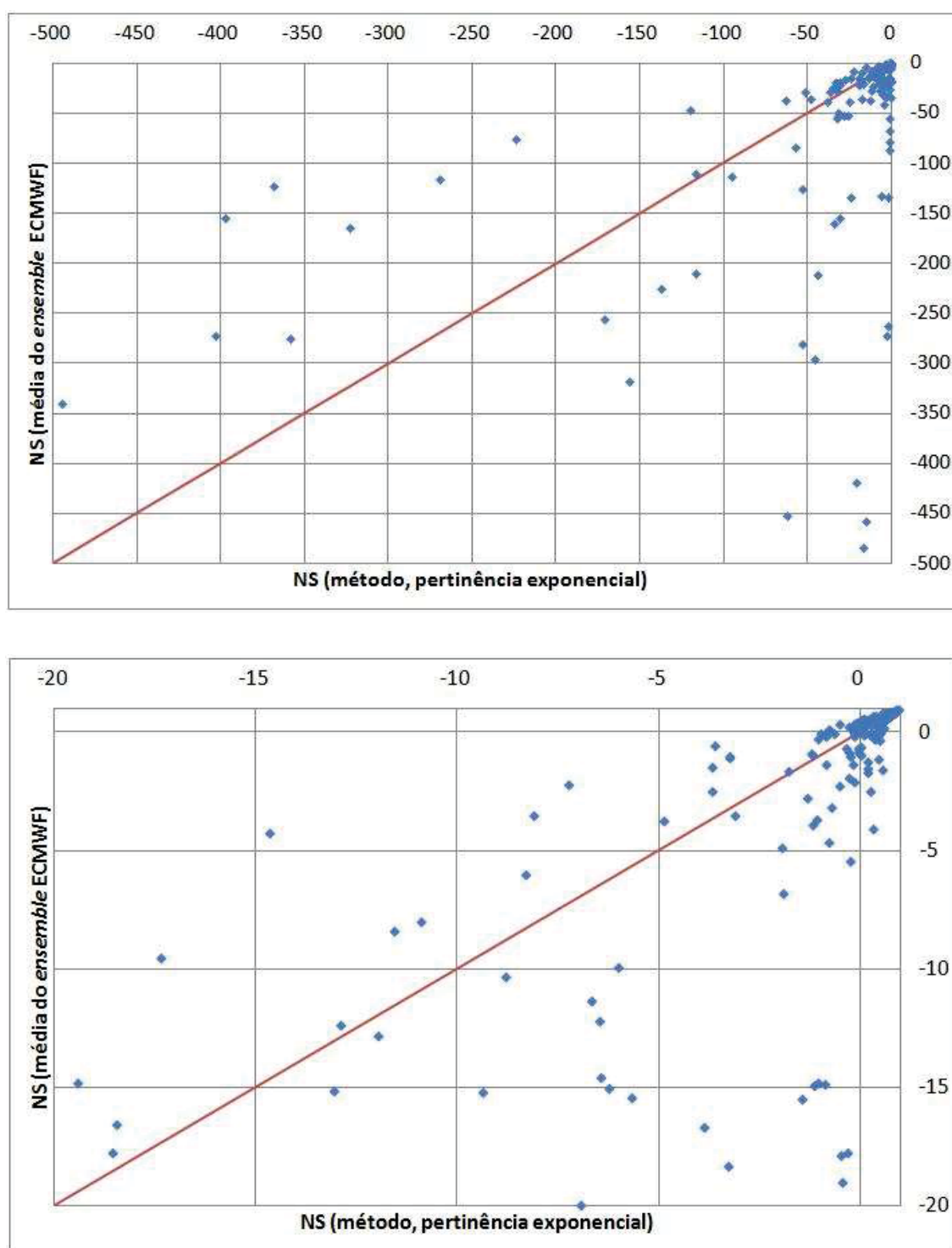


Figura 50 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF): Bacia do Jequitinhonha, chuva acumulada de 6 horas

6.2.3 Resultados da classificação dos *ensembles* por Análise dos componentes principais

Na calibração do método proposto se obtém para cada previsão do histórico de previsões um trio de parâmetros (L , a , b). Na operação *online* é necessário definir qual o trio de parâmetro utilizar. Para isso utilizou-se o método de classificação dos *ensembles* pela análise dos componentes principais (ACP). Agruparam-se todas as previsões do histórico analisado conforme a similaridade dos componentes principais da série de desvios padrões das previsões por *ensemble*. A Tabela 21 apresenta 4 grupos (nomeados A, B, C, D, E, F) obtidos pelo ACP mostrando para cada grupo os parâmetros " L , a , b " da função de pertinência exponencial a ser utilizado no método proposto para pertinência exponencial com *fuzificação* das precipitações. O grupo C corresponde a $L = 0$ no qual o método se transforma igual à média do *ensemble* pluviométrico. O Apêndice A apresenta os grupos e os parâmetros para os demais casos.

Na aplicação online do método proposto a sequência da utilização do ACP é a seguinte: a) calcula-se os desvios padrões das previsões do *ensemble*, b) classifica-se a previsão, através do ACP, descobrindo a qual grupo pertence, c) segue na aplicação do método proposto com os parâmetros L , a , b do grupo selecionado (Tabela 21 ou os parâmetros apresentados do apêndice conforme o caso).

Tabela 21 – Parâmetros médios de cada grupo utilizando o CPTEC e bacia do Jequitinhonha

Grupo	L	a	b
A	1,425	7,221	1,645
B	0,933	2,769	1,230
C	0,000	9,418	0,191
D	0,422	1,686	0,000
E	0,910	8,615	1,017
F	2,317	5,577	3,654

6.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO ONLINE DO MÉTODO

O método posposto, para utilização de previsões em tempo real, utiliza os parâmetros (L , a , b) de um determinado grupo, conforme a similaridade das características do *ensemble* pluviométrico previsto comparado com os *ensembles* pluviométricos dos grupos similares (através do ACP). Os parâmetros L , a e b não serão os mesmos dos ótimos obtidos na calibração destes parâmetros e sim uma média dos parâmetros do mesmo grupo. Inicialmente o método foi aplicado no mesmo período utilizado para a calibração dos parâmetros (01/10/2011 a 28/02/2012).

Como o método não teve sucesso inicial na aplicação nas vazões, como verificado no item 6.1, utilizou-se o método aplicado à *fuzificação* das precipitações.

O método proposto pode ser utilizado com observações de chuva de estações pluviométricas convencionais ou telemétricas. Nas convencionais se realizam 2 leituras diárias para obter uma precipitação diária. As telemétricas possuem geralmente leituras a cada 15 minutos.

No caso de utilização das estações convencionais o primeiro valor observado pode ser a precipitação a cada 12 horas ou diária (1 dia após a previsão meteorológica). No caso da utilização das estações telemétricas sugere-se como primeiro valor observado a utilização da chuva acumulada nas 2 horas após a previsão meteorologia e nova previsão do método a cada 2 horas. Entretanto o método é válido para qualquer intervalo de tempo escolhido para sua aplicação desde que possua dados observados e medidos de chuva.

Os resultados foram avaliados através da comparação da média do índice NS do método proposto e pela média do *ensemble*. Nos casos onde a média do Método é superior foram realizados testes de Hipóteses mais especificamente os testes T e Z. A hipótese testada foi de que a média do NS do método seja maior que a média do NS do *ensemble*. Com isso a hipótese alternativa (H_1) é que a média dos NS do método é maior que a média dos NS do *ensemble*. E a hipóteses nula (H_0) caso contrário.

O teste T e Z são utilizados para verificar se uma média de duas amostras são pertencentes a uma mesma população, ou seja, se as médias são estatisticamente diferentes ou não. O teste Z considera que a variância amostral

pode ser considerada igual a variância populacional. No teste T a variância amostral não é considerada igual a variância populacional.

O teste Z se baseia no cálculo da probabilidade de que a média da amostra a ser testada seja diferente da outra média e considerando a distribuição Normal para a média e para o parâmetro Z. No teste de Hipótese se utiliza a tabela da distribuição normal com grau de significância de 95%.

No teste T a variância amostral não é considerada igual a populacional. Neste caso a variável T tem distribuição de “*t Student*” e se utiliza a tabela T com grau de significância de 95% e grau de liberdade G ou G1. A utilização de G ou G1 depende se as variâncias das duas amostras podem ser consideradas iguais ou não. Para isso se utiliza o teste F (Fischer). A variável F tem distribuição Fischer e se utilizada para teste de hipótese a tabela de distribuição de Fischer.

As fórmulas dos testes são as seguintes:

$$Z = \frac{(M1-M2)}{\frac{DP1}{\sqrt{N1}}} \quad (6.1)$$

$$T = \frac{(M1-M2)}{(DPT \sqrt{\frac{1}{N1} + \frac{1}{N2}})} \quad (6.2)$$

$$F = \frac{VAR1}{VAR2} \quad (6.3)$$

$$G = \frac{(w1+w2)^2}{\left(\frac{w1^2}{(N1+1)} + \frac{w2^2}{(N1+1)}\right)} \quad (6.4)$$

$$G1 = N1 + N2 - 2 \quad (6.5)$$

Sendo

M1: media da amostra 1,

M2: média da amostra 2,

DP1: desvio padrão da amostra 1,

DPT: desvio padrão da amostra 1 e 2 (considerando amostra única),

N1: tamanho da amostra 1,

N2: tamanho da amostra 2,

VAR1: variância da amostra 1,

VAR2: variância da amostra 2.

G: grau de liberdade para o teste F no caso de variâncias das duas amostras estatisticamente diferentes.

G1: grau de liberdade para o teste F no caso de variâncias das duas amostras estatisticamente iguais.

6.3.1 Resultado nas precipitações com a utilização de chuvas acumuladas diárias

a) *Bacia do Itabapoana*

As Figura 51 e Figura 52 apresentam exemplos de precipitações acumuladas previstas pelo ensemble e a prevista pelo método (vf), utilizando observação das estações pluviométricas da bacia do Itabapoana (chuva acumulada diária).

A Figura 53 até Figura 55 apresentam a comparação dos índices de Nash-Sutcliffe do método utilizando precipitação diária e com a média do *ensemble* pluviométrico para a bacia do Itabapoana. Estas figuras foram feitas utilizando todos as previsões realizadas pelo método proposto com dados observados de chuva até 24 horas após a previsão pluviométrica por ensemble.

Da Figura 56 até a Figura 58 são apresentadas comparações dos índices NS em função do instante de aplicação do método proposto para esta bacia hidrográfica.

Por estas figuras pode-se observar que o método proposto não é melhor que a média do *ensemble* podendo ser considerado equivalente ou pior. Pela Figura 53 e Figura 54 nota-se a quantidade maior de pontos na parte superior à linha de 45° o que indica a inferioridade do método proposto. Na Figura 55 os métodos são equivalentes pois não há predominância clara da quantidade de pontos acima ou abaixo da linha de 45°. Na bacia do Itabapoana o método proposto apresentou um melhor NS quando aplicado no ensemble do CPTEC nas primeiras 24 horas após a data da previsão pluviométrica. Esta afirmação foi constatada na Figura 58 onde mostra melhores NS do método proposto para este período. Entre a Figura 56 e Figura 57 se nota que o índice NS para o método proposto é inferior seja qual for o momento da aplicação do método.

Entretanto os testes T e Z indicam que a melhora da média do NS proporcionada pelo método proposto (quando utilizado até 24 horas após a previsão pluviométrica) não é suficiente para afirmar que o método proposto seja melhor que a média do *ensemble*.

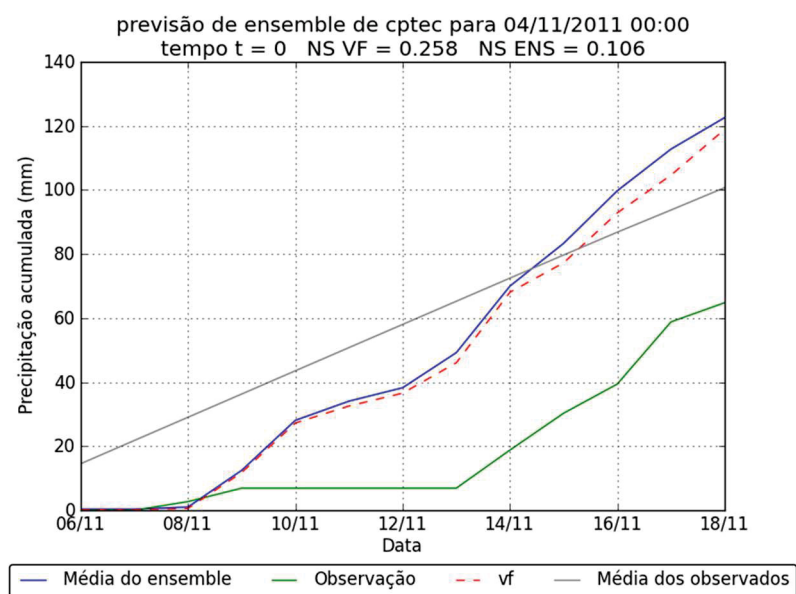


Figura 51 – Previsão pluviométrica por *ensemble* (CPTEC) em 04 de novembro de 2011 à meia-noite (média do ensemble em linha azul) e previsão pluviométrica pelo método proposto em 05 novembro de 2011 à meia-noite (em traços vermelhos) utilizando estações pluviométricas convencionais. Chuva acumulada diária: Bacia do Itabapoana.

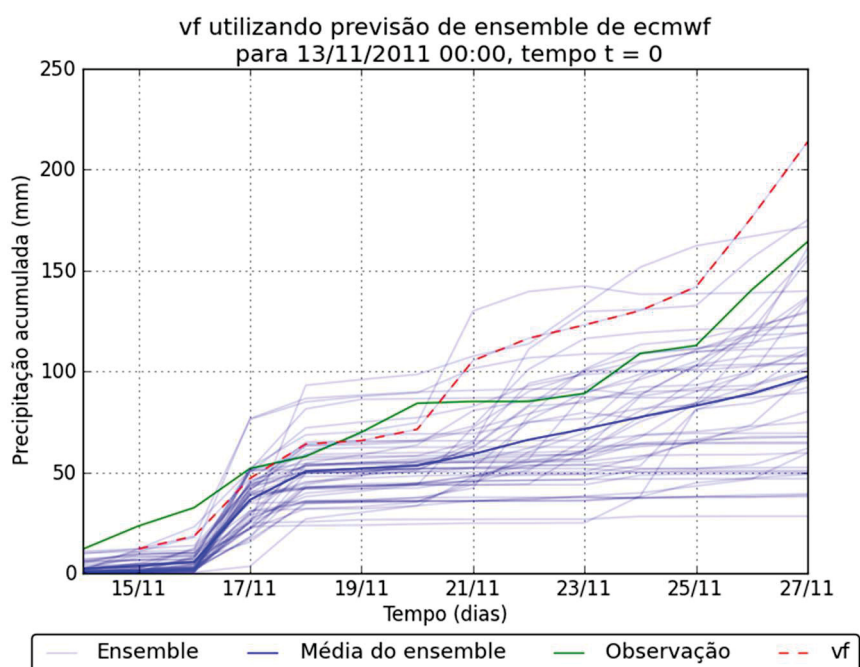


Figura 52 – Previsão pluviométrica por *ensemble* (ECMWF) em 13 de novembro de 2011 à meia-noite e previsão pluviométrica pelo método proposto em 14 de novembro de 2011 à meia noite utilizando estações pluviométricas convencionais (linha vermelha). Chuva acumulada diária: Bacia do Itabapoana.

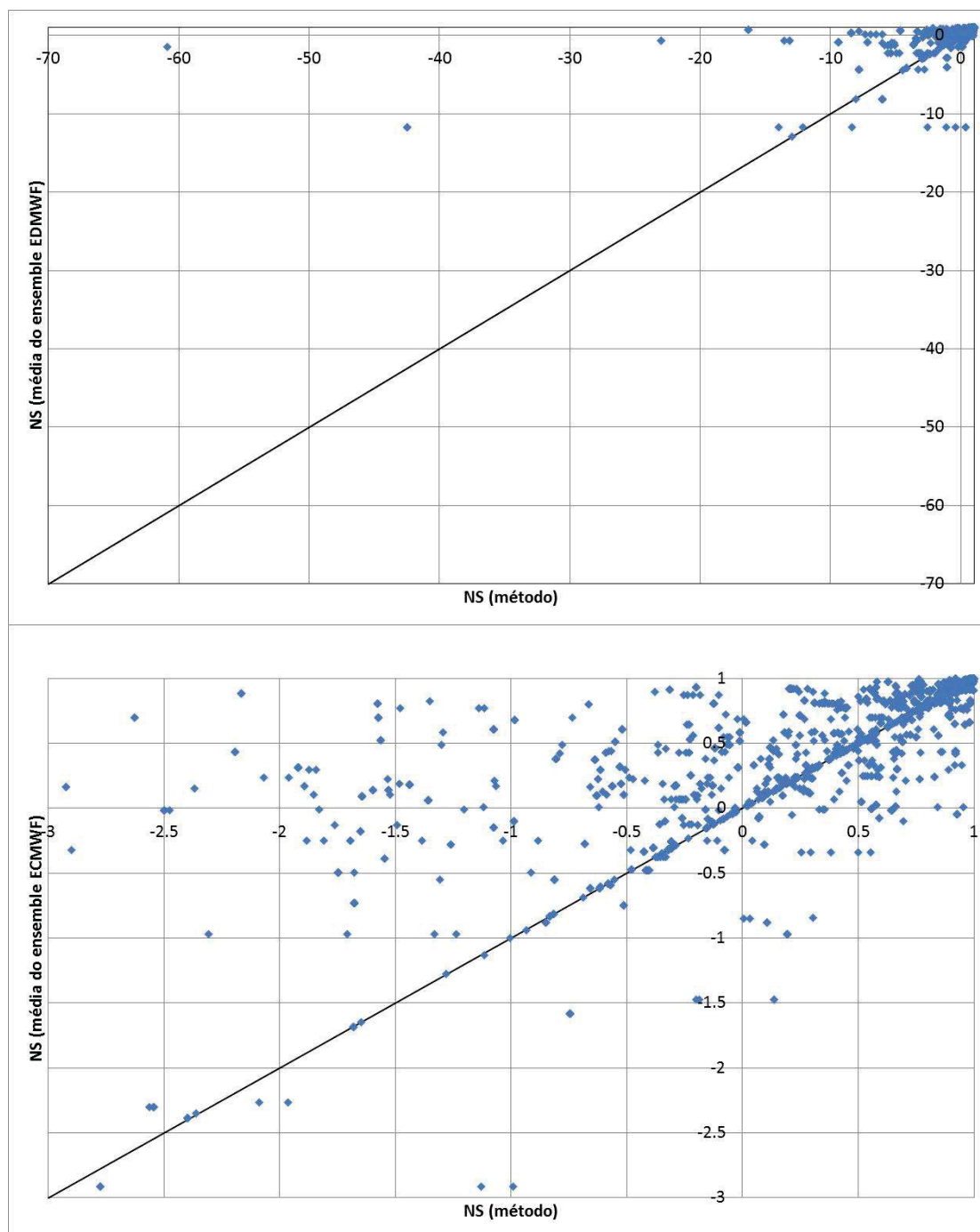


Figura 53 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF): Bacia do Itabapoana.

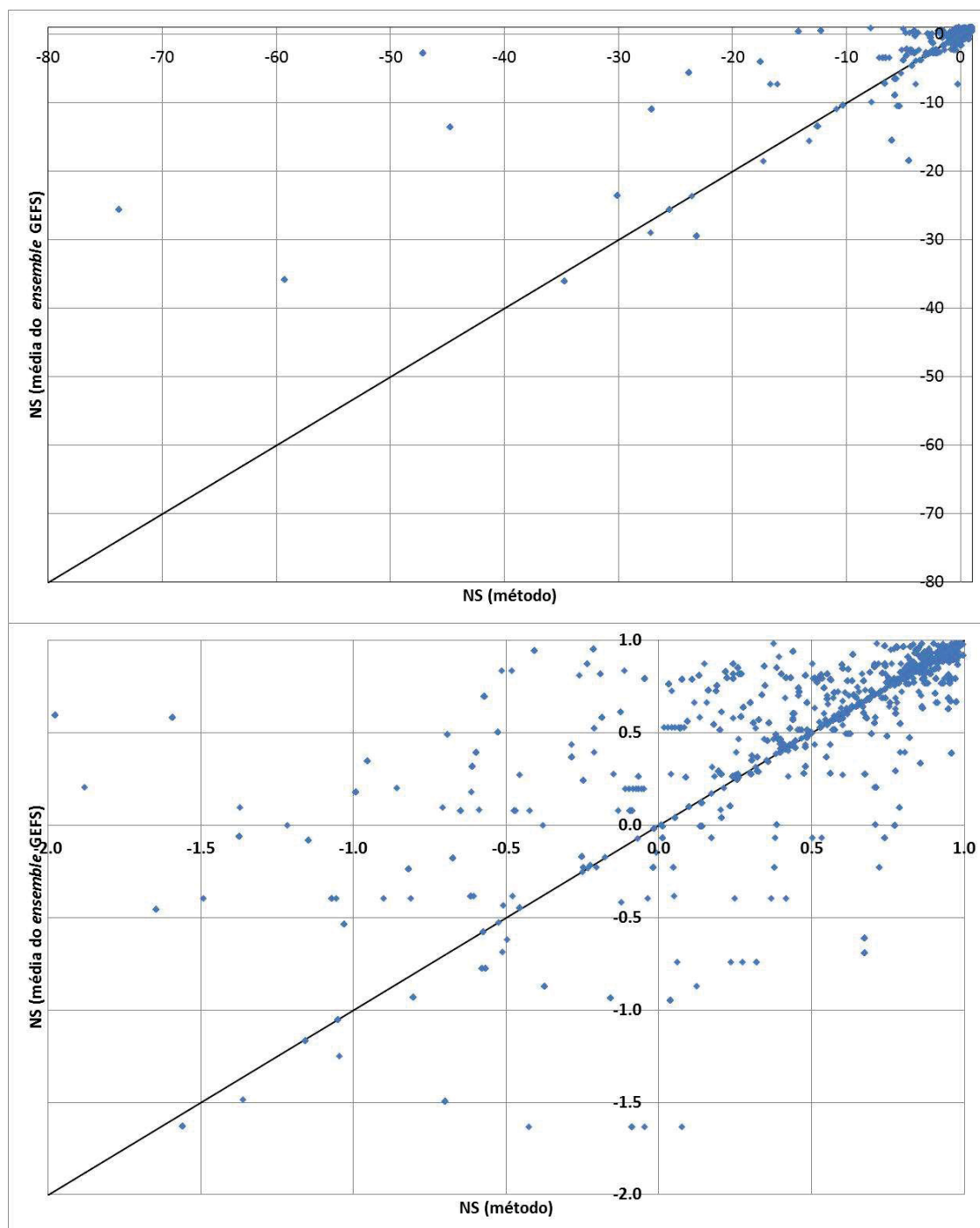


Figura 54 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS): Bacia do Itabapoana.

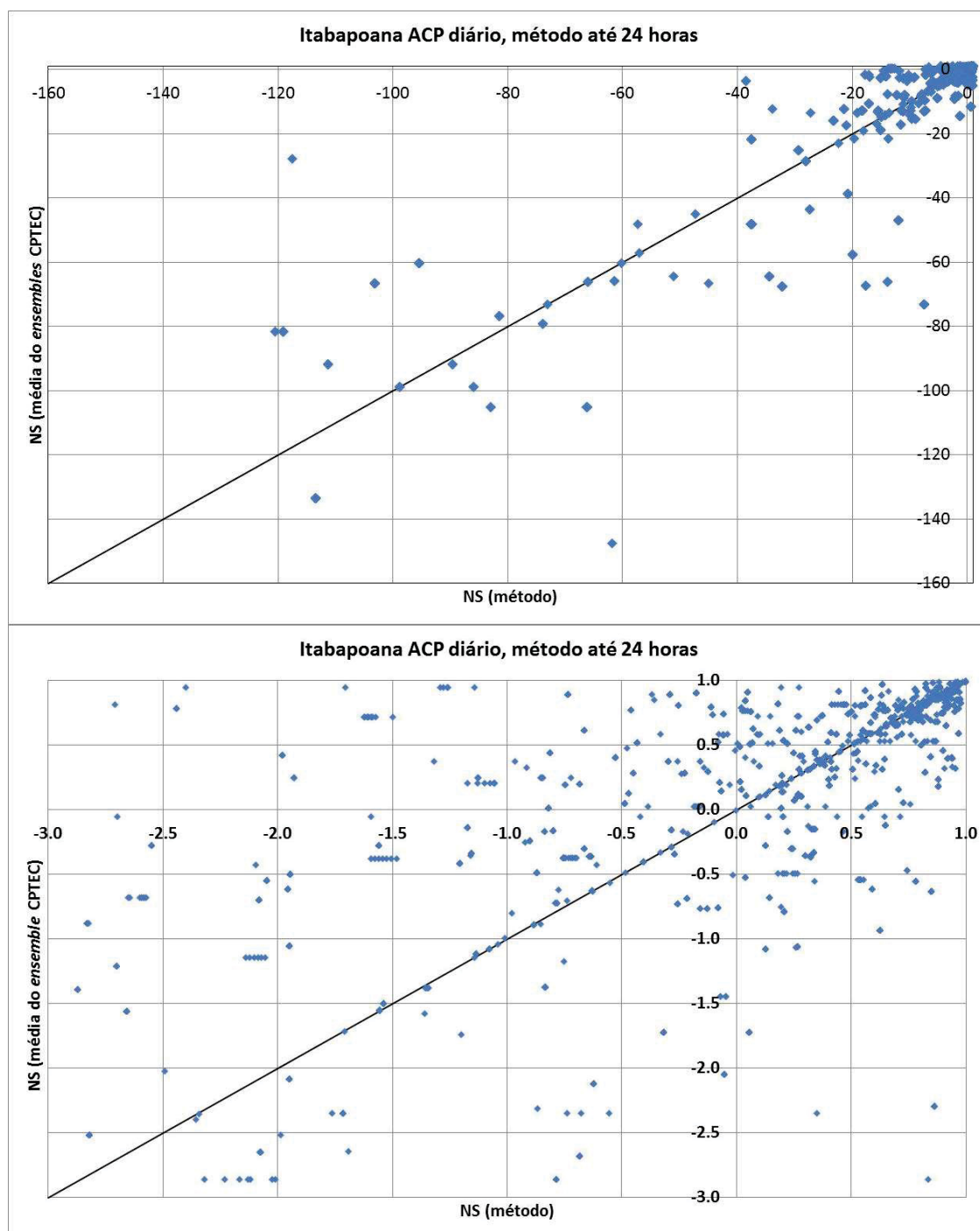


Figura 55 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuva diária e pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC): Bacia do Itabapoana.

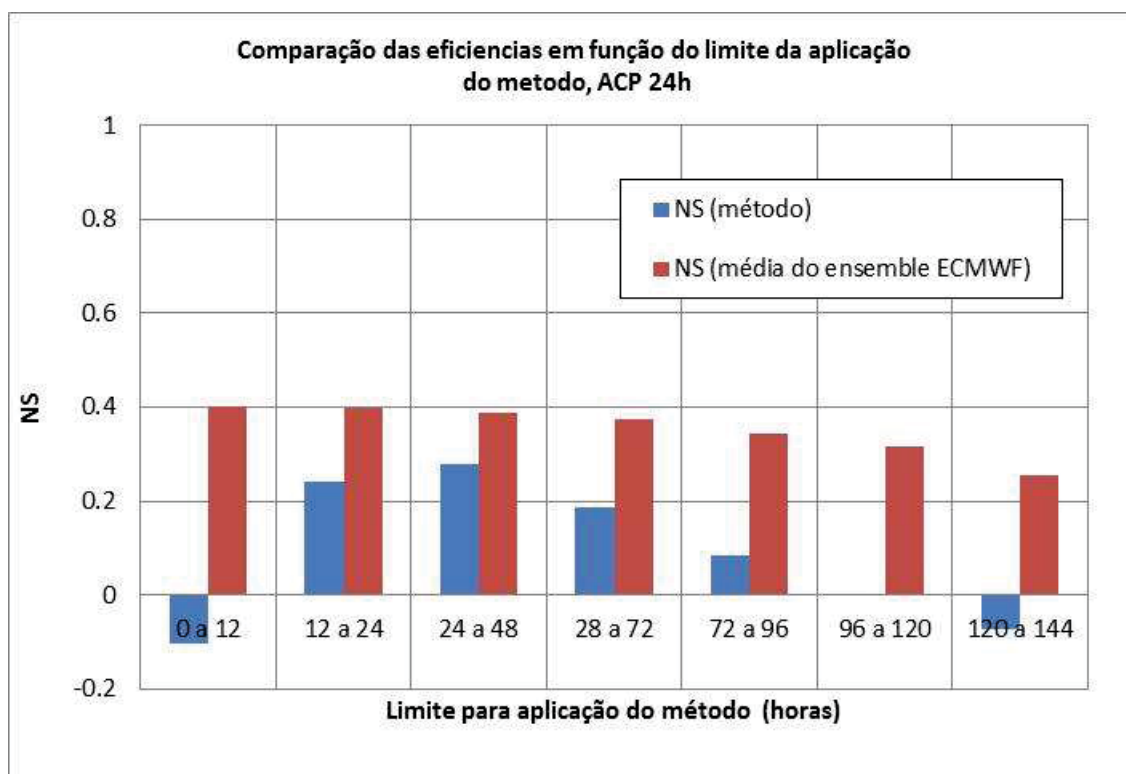


Figura 56 – Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão da precipitação pluviométrica por *ensemble ECMWF*): Bacia do Itabapoana.

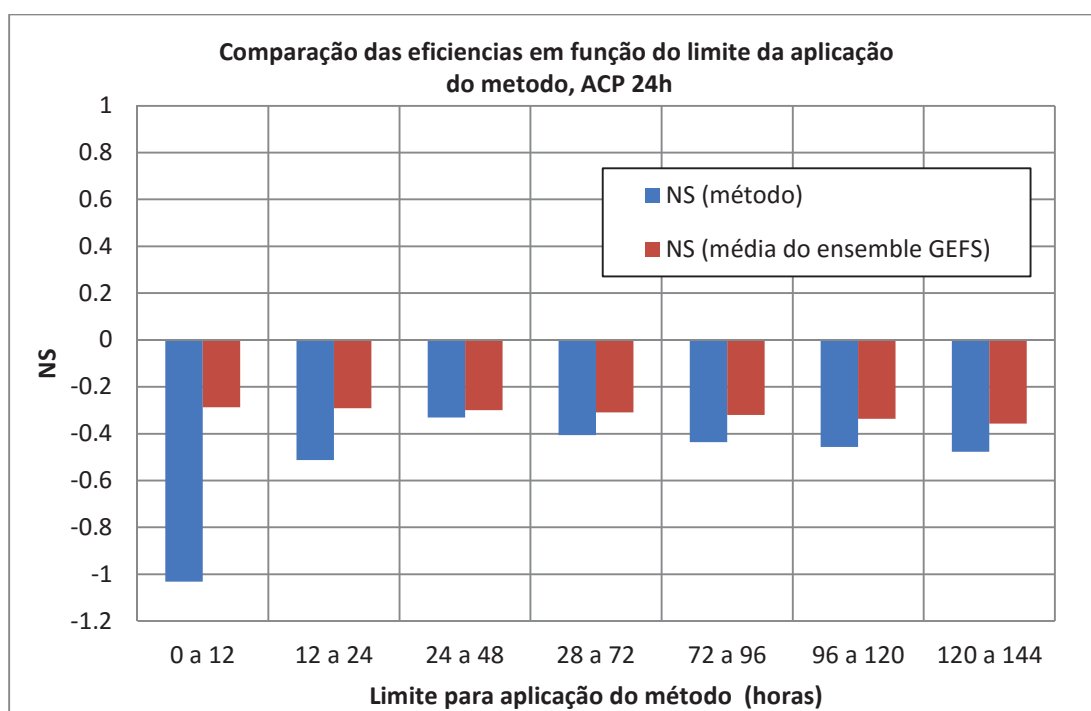


Figura 57- Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão da precipitação pluviométrica por *ensemble GEFS*): Bacia do Itabapoana.

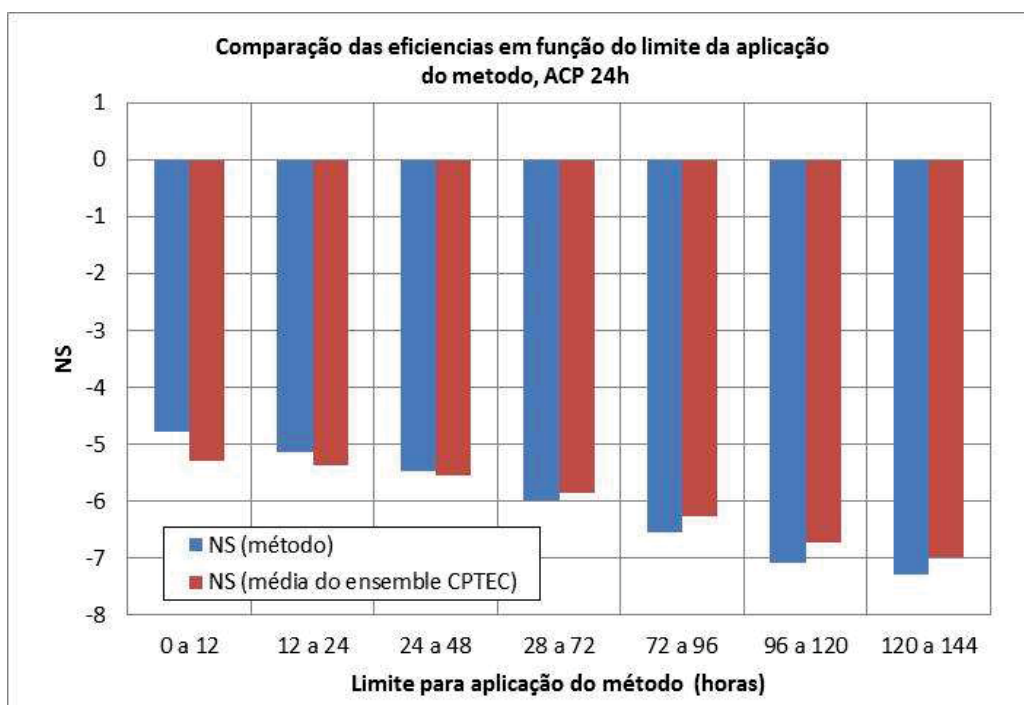


Figura 58 - Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão da precipitação pluviométrica por *ensemble CPTEC*): Bacia do Itabapoana.

b) Bacia do Jequitinhonha

A Figura 59 até Figura 61 apresentam a comparação dos índices de Nash-Sutcliffe confrontando o método utilizando precipitação diária com a média do *ensemble* pluviométrico para a bacia do Jequitinhonha. Nas Figura 62 até a Figura 64 são apresentadas comparações dos índices Nash-Sutcliffe em função do instante da aplicação do método proposto, ou seja, quantas horas após a previsão pluviométrica por *ensemble* foi utilizado a observação pluviométrica e aplicado o método proposto. Por estas figuras pode-se observar que o método proposto não é melhor (para o rio Jequitinhonha) que a média dos *ensembles* podendo ser considerado equivalente, seja qual for o modelo de previsão meteorológica utilizado. Entretanto entre a Figura 62 e Figura 64 se observa um NS melhor para o método proposto quando aplicado entre 24 a 48 após a previsão pluviométrica para esta bacia hidrográfica.

Após aplicação de testes concluiu-se que na bacia do Jequitinhonha apenas no caso de utilização do *ensemble* do GEFS e aplicando o método no 2º dia após a previsão pluviométrica o método teve uma leve melhora. Esta melhora foi testada pelos testes estatísticos Z e T de hipótese. No caso de Jequitinhonha e *ensemble*

GEFS o $Z = 2,501 > 1,64$ e $T = 1,87 > 1,64$, portanto, a diferença das médias dos NS é suficiente para afirmar a melhoria do NS pelo Método proposto (NS do método: -0,266; NS do *ensemble*: -0,394).

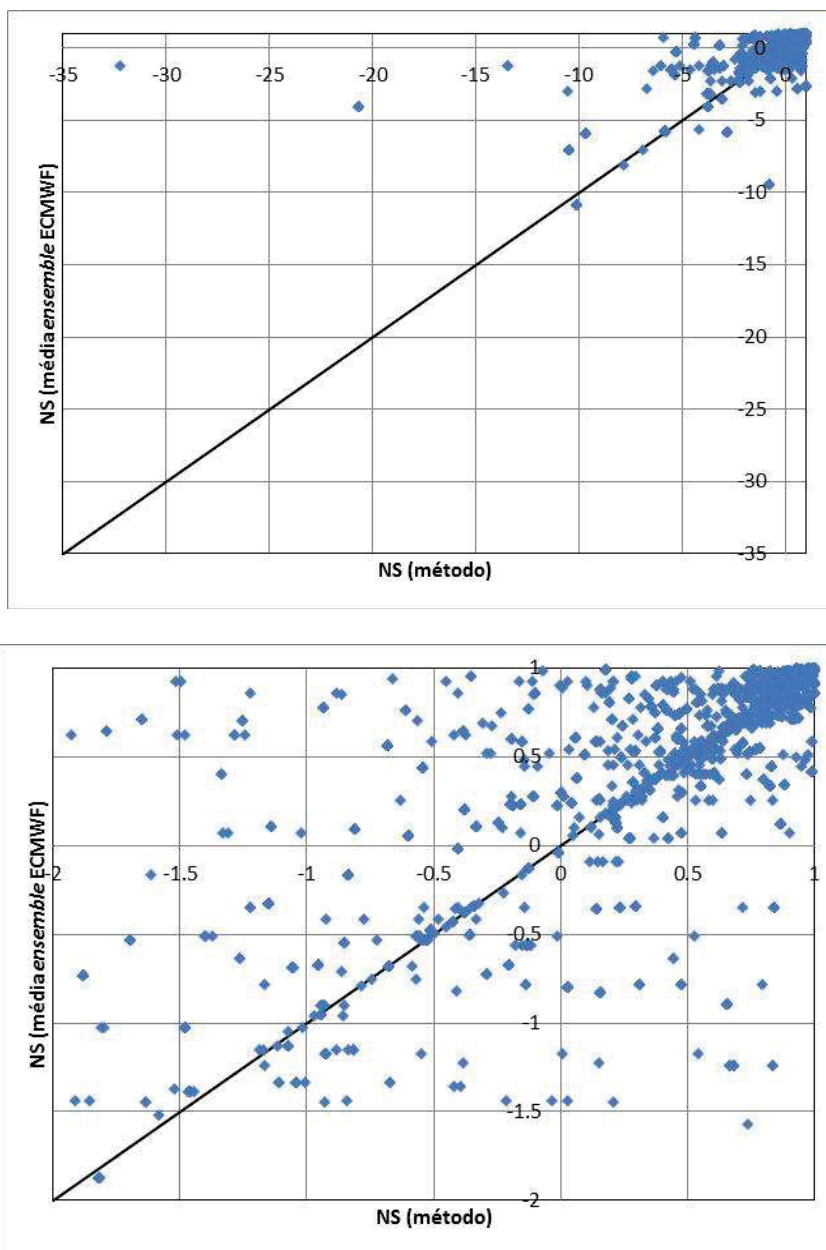


Figura 59 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF): Bacia do Jequitinhonha.

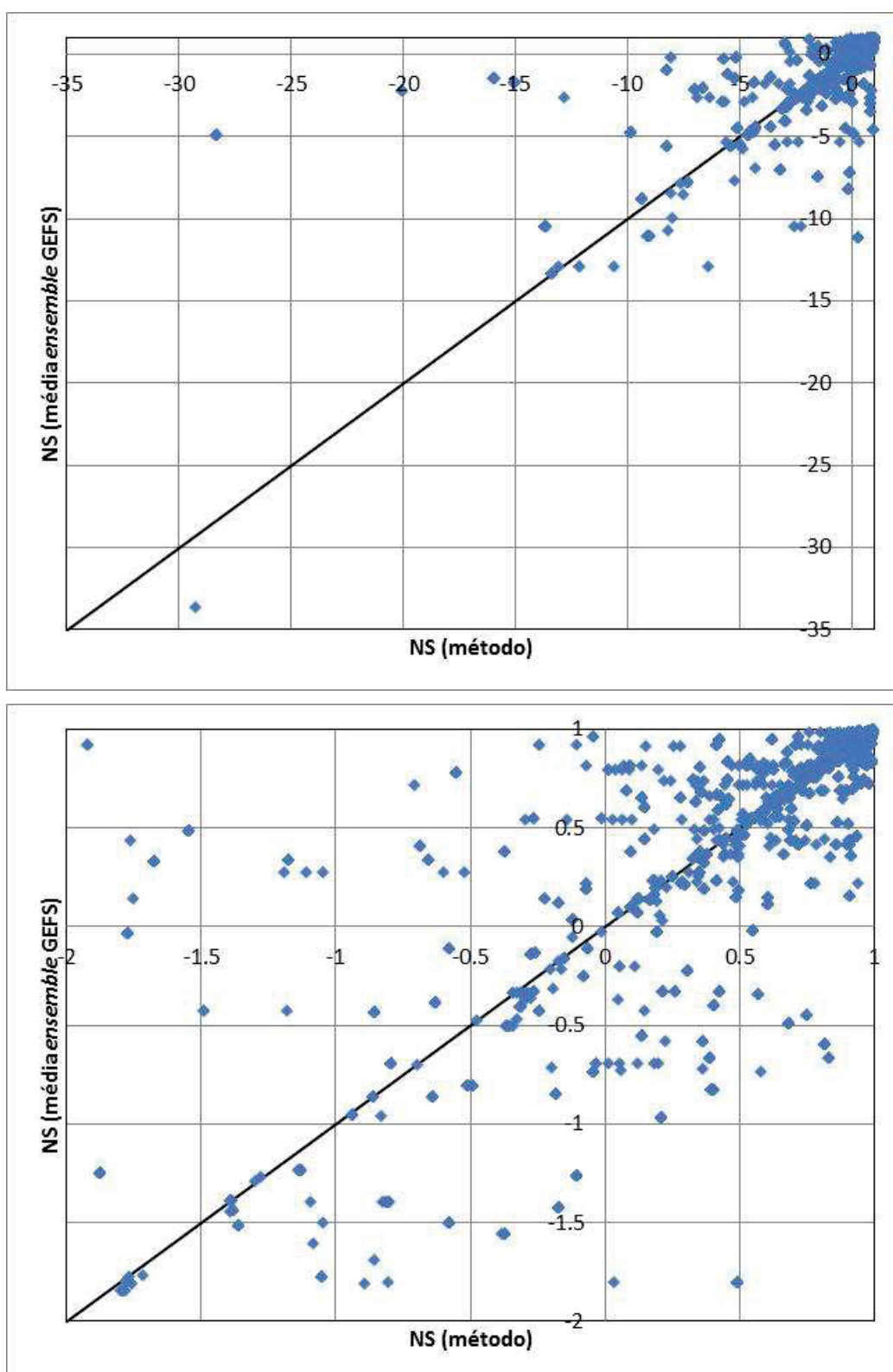


Figura 60 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas diárias e pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS): Bacia do Jequitinhonha.

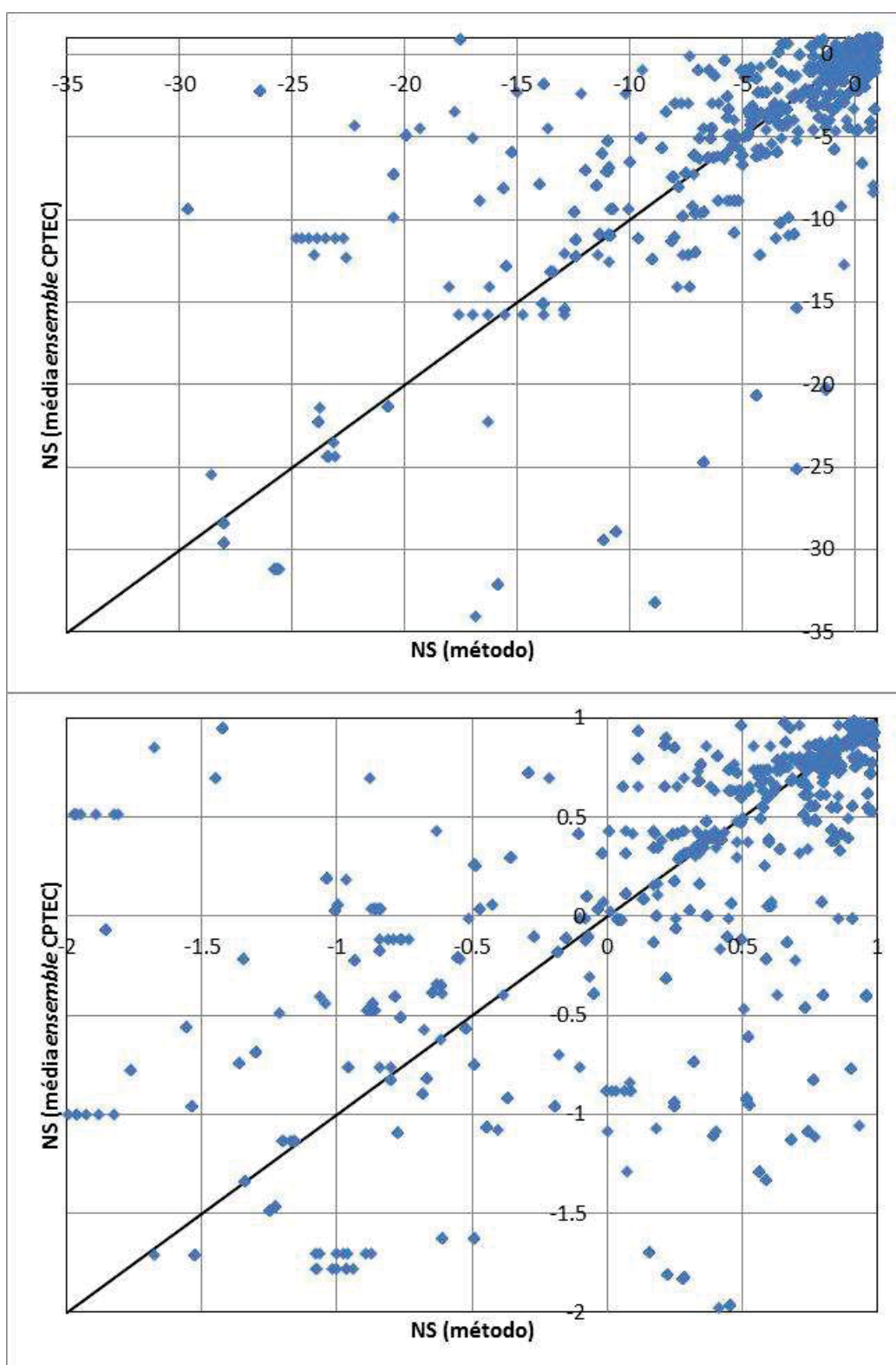


Figura 61 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuva diária e pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC): Bacia do Jequitinhonha.

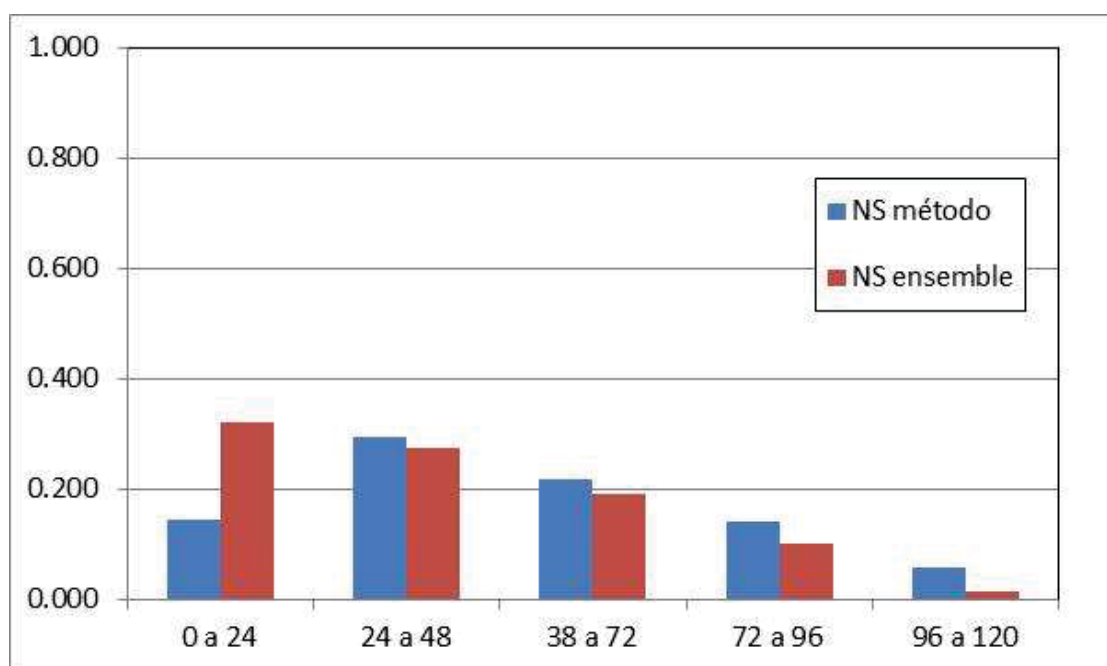


Figura 62 – Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão pluviométrica por *ensemble ECMWF*): Bacia do Jequitinhonha.

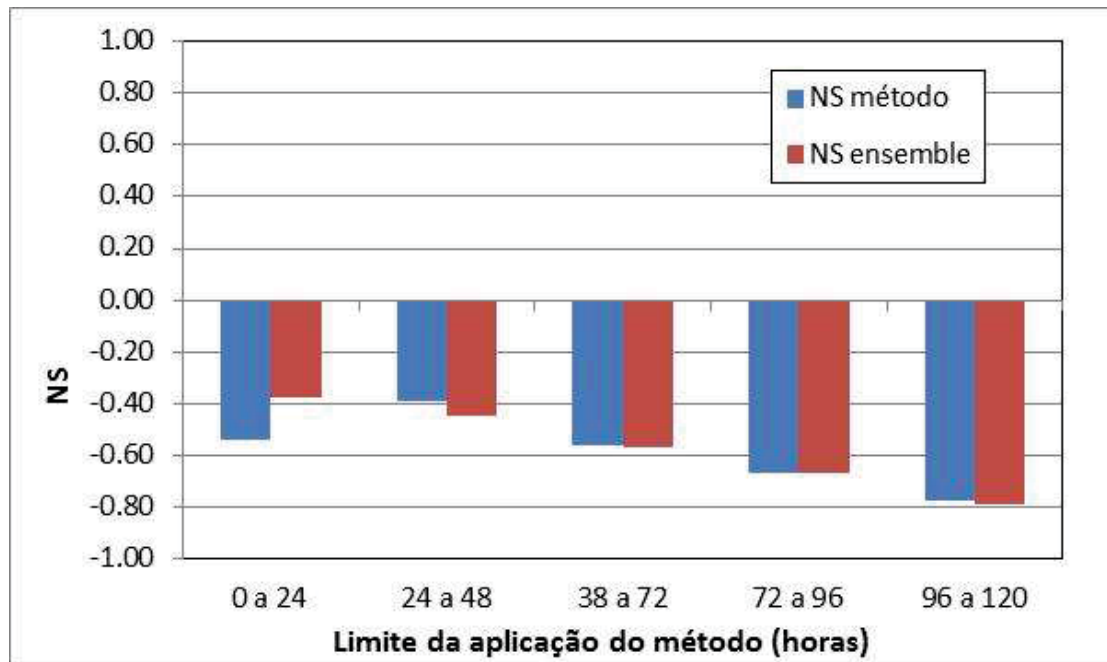


Figura 63- Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão pluviométrica por *ensemble GEFS*): Bacia do Jequitinhonha.

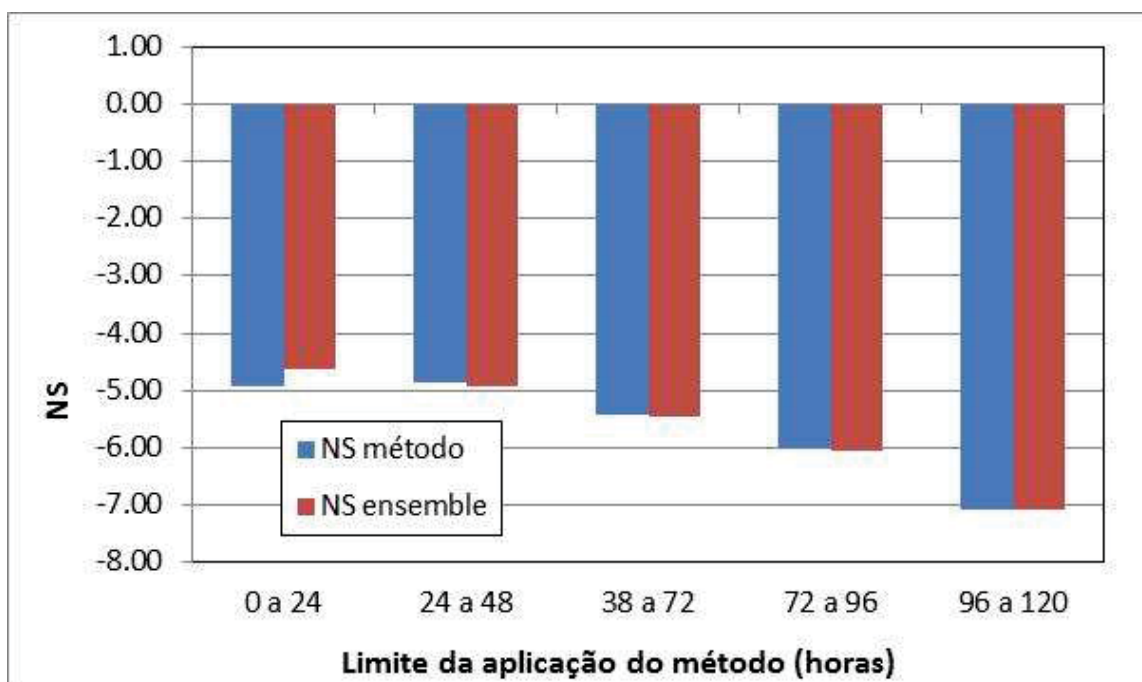


Figura 64 - Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método (horas após a previsão pluviométrica por *ensemble CPTEC*): Bacia do Jequitinhonha.

6.3.2 Resultado nas precipitações com a utilização de chuvas acumuladas cada 6 horas em Itabapoana

A Figura 65 e apresenta exemplo de precipitações acumuladas previstas pelo *ensemble* e a prevista pelo método (vf), utilizando observação das estações pluviométricas telemétricas da bacia do Itabapoana (chuva acumulada de 6 horas).

Da Figura 66 até Figura 68 se ilustram as comparações dos índices de Nash-Sutcliffe do método utilizando precipitação de 6 horas e com a média do *ensemble* pluviométrico para a bacia do Itabapoana. Estas figuras foram feitas utilizando todos as previsões realizadas pelo método proposto. Se separarmos as previsões realizadas pelo método proposto em função do instante pelo qual se realiza estas previsões podemos analisar a eficiência do método em função deste parâmetro. Esta análise é mais minuciosa que analisar todas as previsões como um todo. Da Figura 69 até a Figura 71 são apresentadas comparações dos índices Nash-Sutcliffe em função do instante da aplicação do método proposto.

As Figura 66, Figura 67 e Figura 68 mostram que o método proposto é equivalente a utilizar a média do *ensemble* (para qualquer instituto analisado), isto

porque não há tendência entre dos pontos estarem mais perto do eixo vertical ou horizontal.

Entretanto, analisando as Figura 70 e Figura 71 pode-se observar que o método proposto é levemente melhor quando aplicado no primeiro e no segundo dia após a previsão pluviométrica e nos *ensembles* do GEFS e CPTEC. Testes estatísticos T e Z foram aplicados e confirmam que o método proposto tem a média do NS maior que a mesma média NS sem a aplicação do Método quando se utiliza o ensemble do CPTEC para a aplicação do método no primeiro e segundo dia. Entretanto estes testes T e Z mostraram que na utilização do ensemble GEF o método somente é superior (maior NS) quando é aplicado no segundo dia após a previsão pluviométrica.

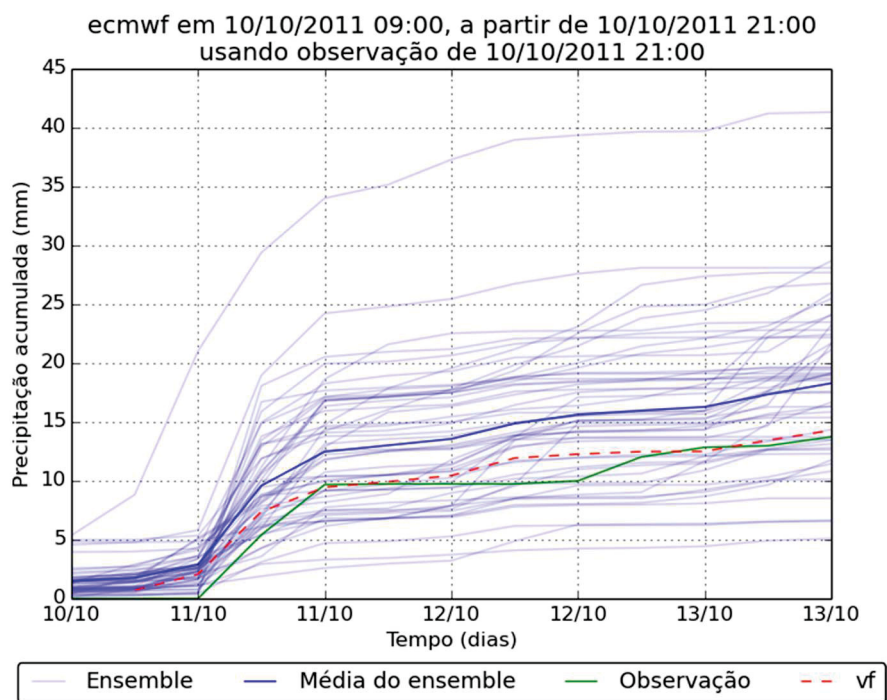


Figura 65 – Previsão pluviométrica por *ensemble* (ECMWF) em 10 de outubro de 2011 às 9 horas e previsão pluviométrica pelo método proposto em 10 de outubro de 2011 às 21 horas utilizando observação do dia 10/10/2011 as 21 horas de estações telemétricas (linha vermelha): Bacia do Itabapoana, chuva acumulada 6 horas.

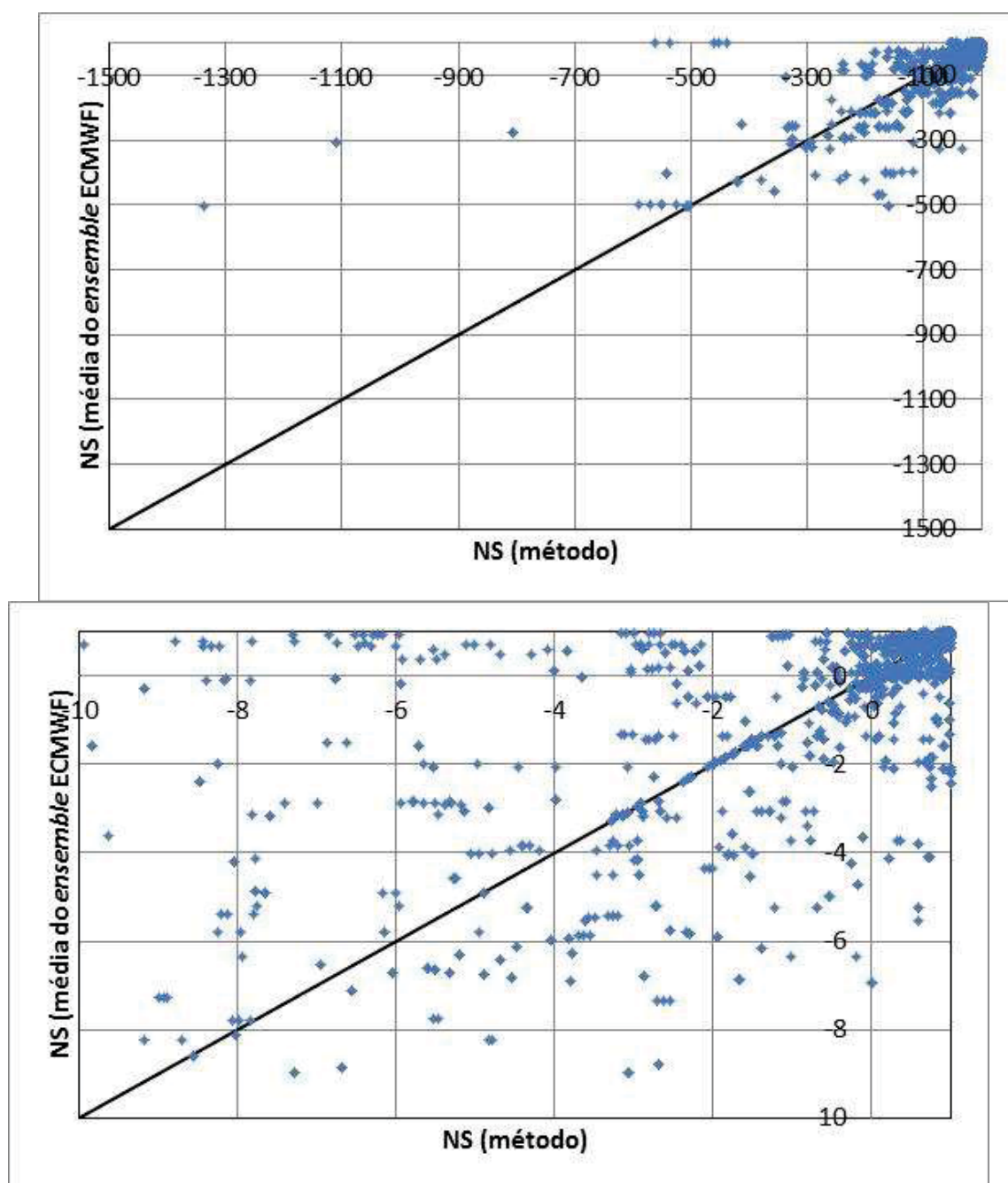


Figura 66 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas cada 6 horas e pertinência exponencial) e da média do *ensemble* pluviométrico (ECMWF): Bacia do Itabapoana.

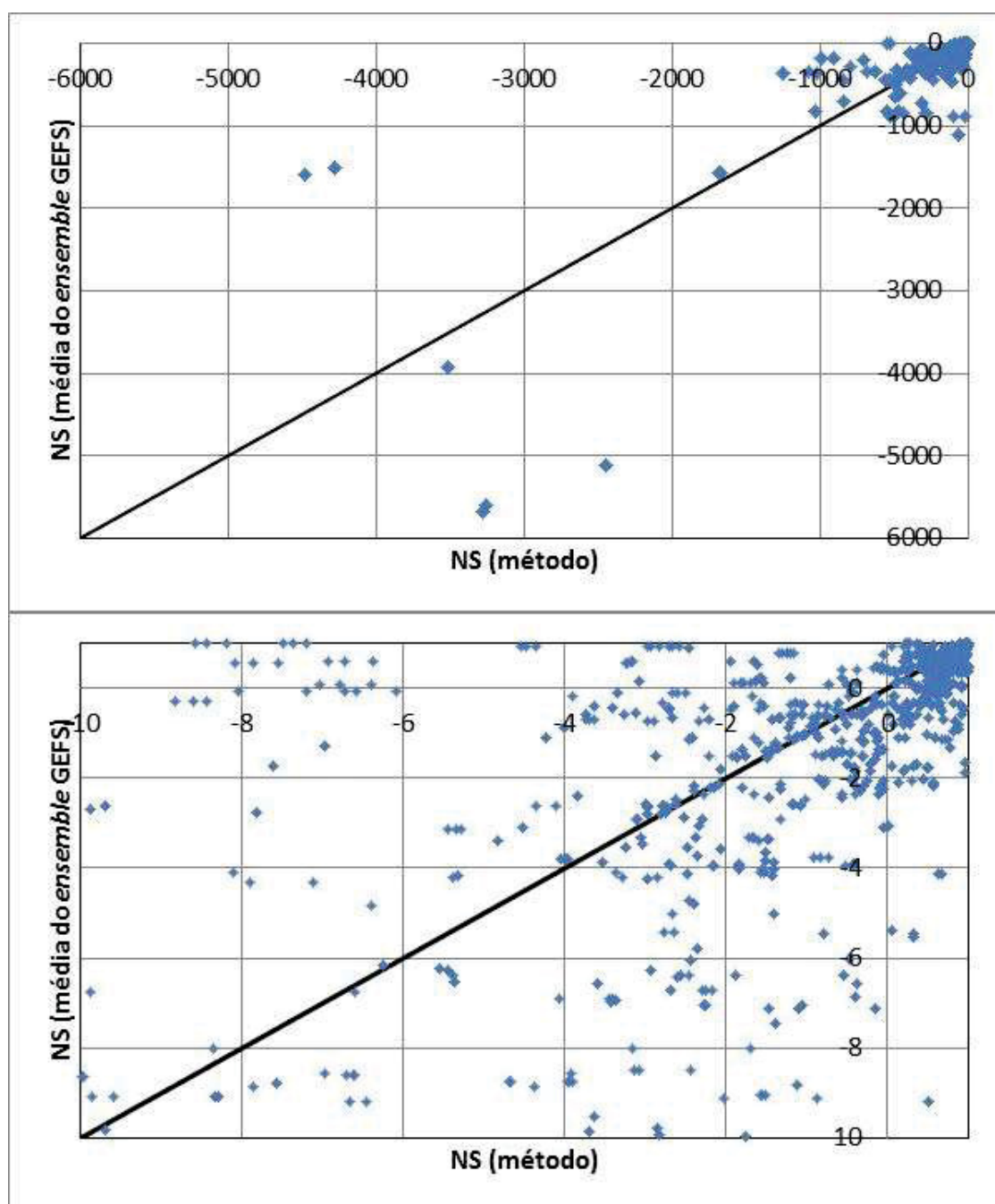


Figura 67 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuvas cada 6 horas e pertinência exponencial) e da média do *ensemble* pluviométrico (GEFS): Bacia do Itabapoana.

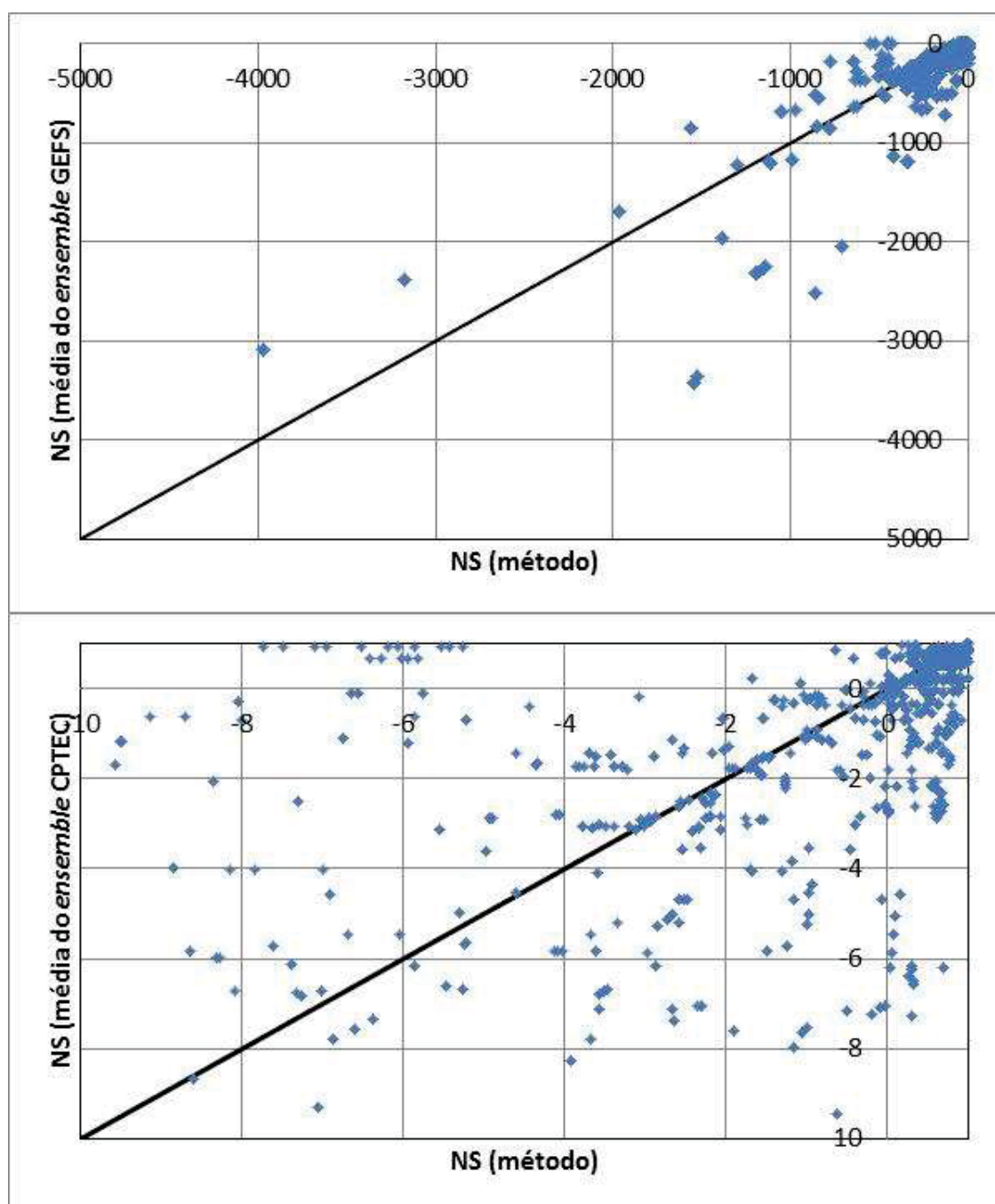


Figura 68 – Comparação entre os índices de NS do método proposto (utilizando chuva cada 6 horas e pertinência exponencial) e da média do *ensemble* pluviométrico (CPTEC): Bacia do Itabapoana.

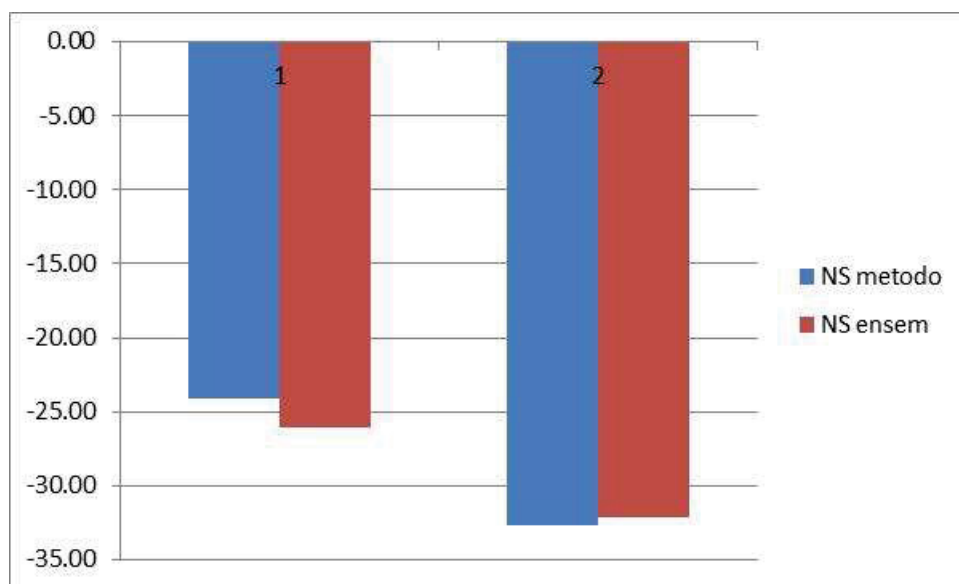


Figura 69 – Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método fuzificando chuvas e 6 horas (eixo x: dias após a previsão pluviométrica por *ensemble ECMWF*).

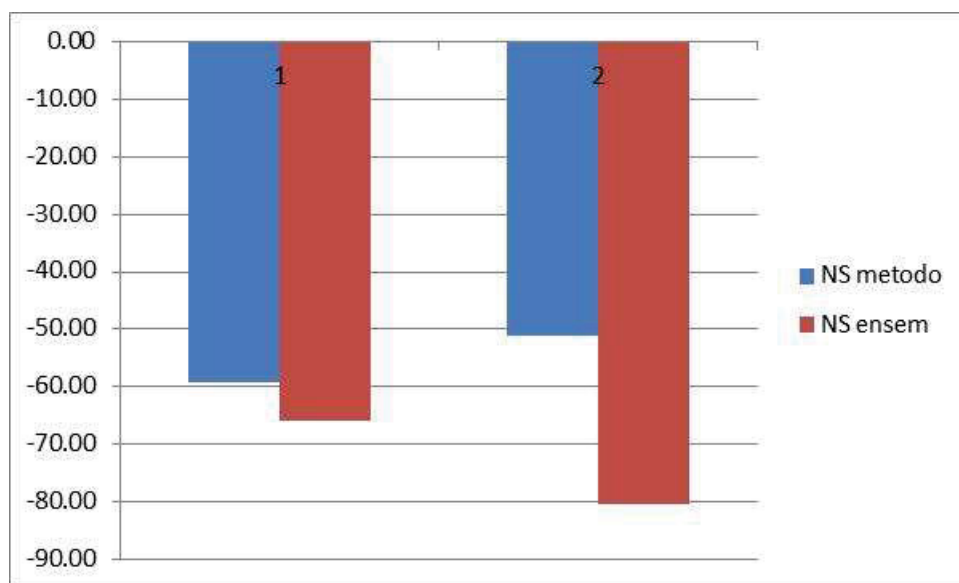


Figura 70- Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método fuzificando chuvosa de 6 horas (eixo x: dias após a previsão pluviométrica por *ensemble GEFS*).

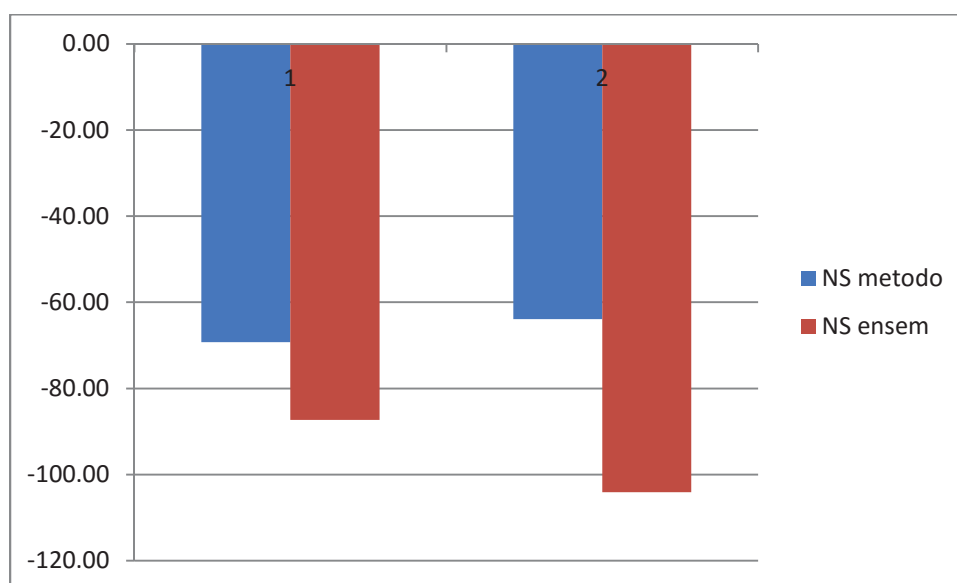


Figura 71 - Comparação dos índices NS em função do instante da aplicação do método fuzzificando chuvas de 6 horas (eixo x: dias após a previsão pluviométrica por *ensemble CPTEC*).

6.3.3 Resultado nas vazões com a utilização de chuvas acumuladas diárias

Neste item são apresentados os resultados do método proposto com fuzzificação das precipitações (diárias) nas vazões em Itabapoana e Jequitinhonha e utilizando a função de pertinência exponencial por ter sido a que deu melhor performance na fase de calibração. Os resultados analisados neste item são para aplicação no método as 2, 4 e 6 horas após a previsão pluviométrica por *ensemble*.

a) *Bacia do Itabapoana*

Entre a Figura 72 e Figura 77 são apresentados os resultados da performance do método proposto e da média do *ensemble* hidrológico para a bacia de Itabapoana

Pela Figura 72 se percebe uma equivalência entre o método proposto e a média do *ensemble* para $NS > -90$. Pela Figura 73 e Figura 74 se percebe que no método proposto ocorreram algumas previsões com NS muito piores que o NS da média do *ensemble* na bacia do Itabapoana.

A Tabela 10 apresenta as estatísticas: média, mediana, máximo e mínimo do índice NS para o método proposto e para a média do *ensemble hidrológico* previsto.

Pela tabela pode se verificar que o método proposto é inferior à média do *ensemble* hidrológico, pois possui média e mediana inferiores. Além disso, a dispersão das previsões é maior como se nota nos valores de máximo e mínimo.

Tabela 22 - Estatística comparativa do Nash-Sutcliffe, Itabapoana

	CPTEC		GEFS	
	Método	CPTEC	Método	GEFS
Máximo	0.45	0.28	0.67	0.58
Média	-44.49	-15.51	-8.49	-6.78
Mediana	-7.32	-8.53	-2.78	-1.67
Mínimo	-587.92	-138.16	-57.98	-47.53

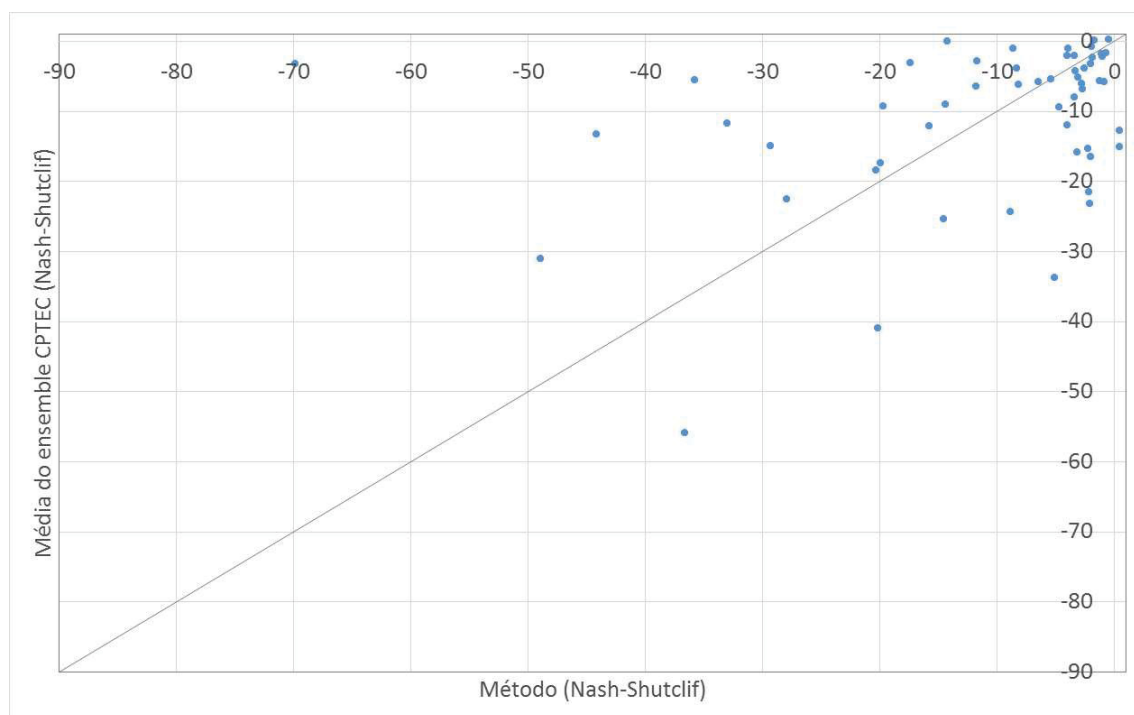


Figura 72 - Comparação entre os índices de NS do método proposto e da média do *ensemble* hidrológico (plu: CPTEC) para a bacia do Itabapoana.

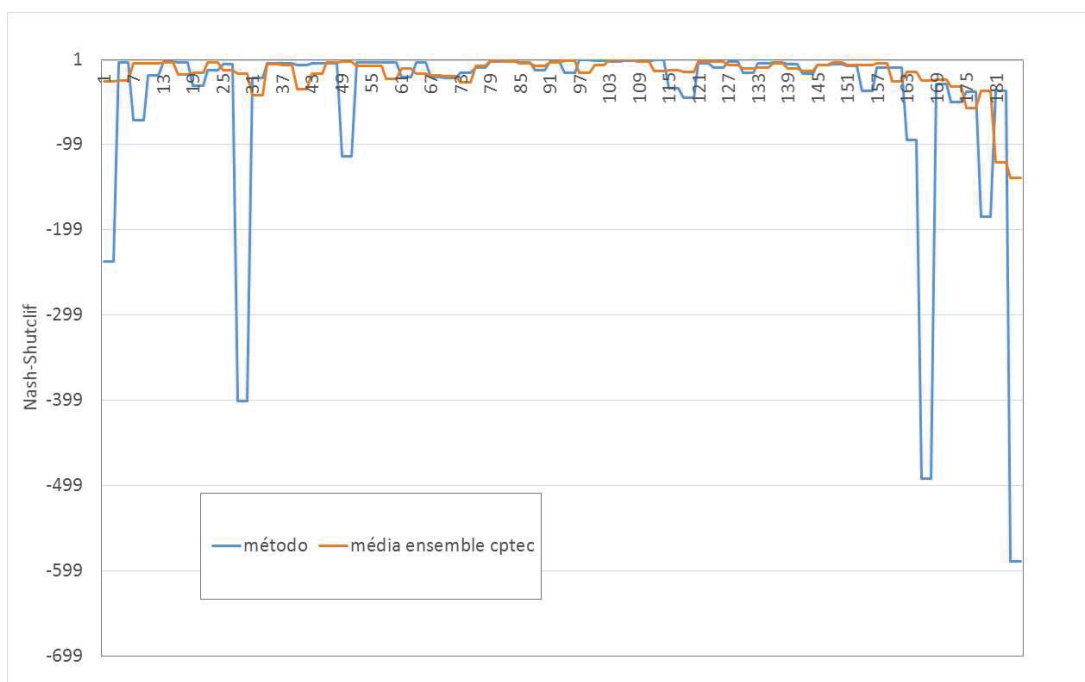


Figura 73 – Índices de NS em função das datas de previsões. Itabapoana e *ensemble* CPTEC.

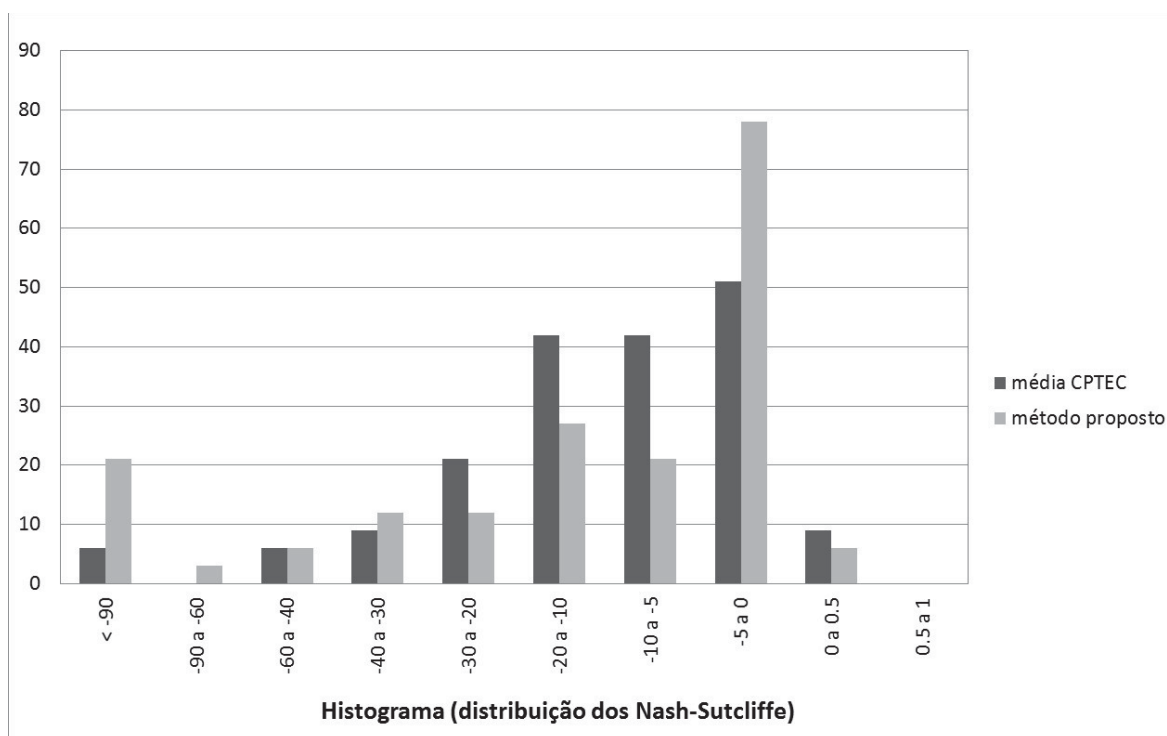


Figura 74 – Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia de Itabapoana e *ensemble* CPTEC.

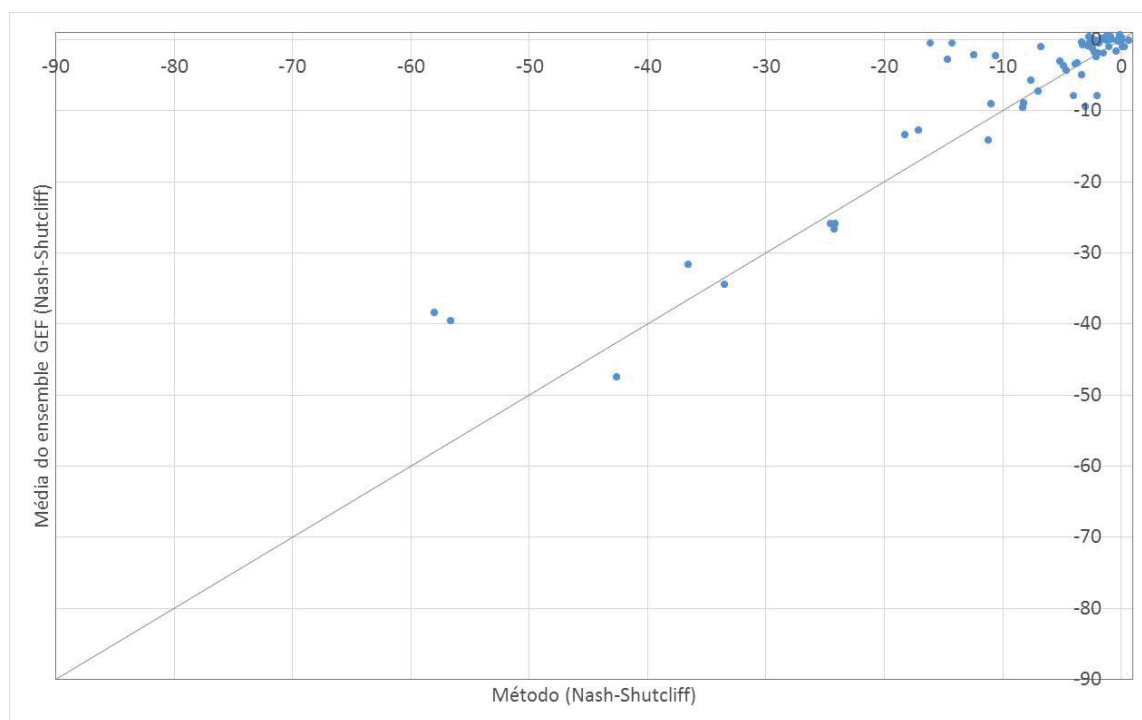


Figura 75 - Comparação entre os índices de NS do método proposto e da média do *ensemble* hidrológico (pluv: GEFS) para a bacia do Itabapoana.

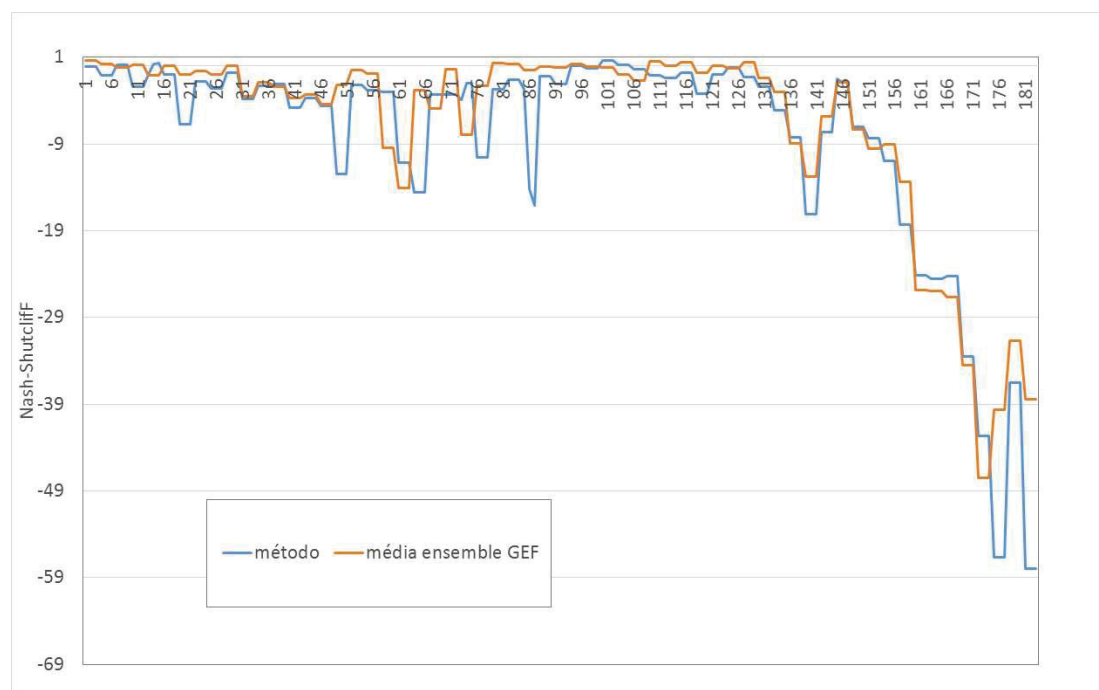


Figura 76 - Índices de NS em função das datas de previsões. Itabapoana e *ensemble* GEFS.

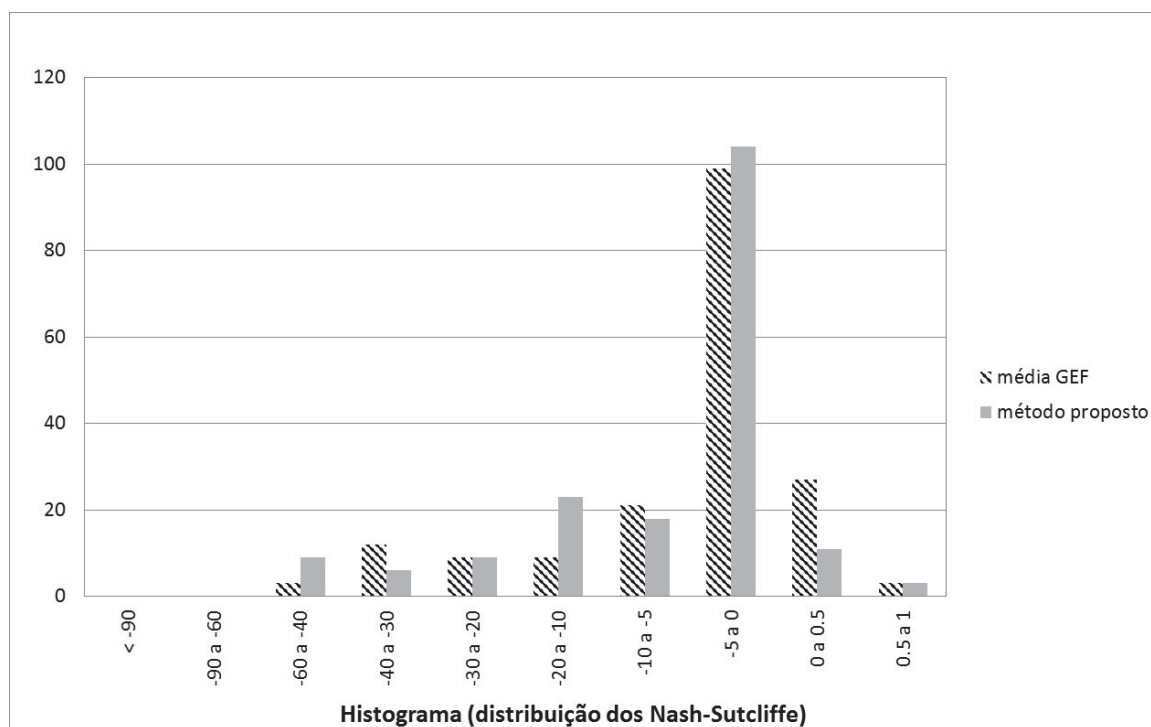


Figura 77 - Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia de Itabapoana, *ensemble* GEFS.

b) Bacia do Jequitinhonha

Entre a Figura 78 e Figura 83 são apresentados os resultados da performance do método proposto e da média do *ensemble* hidrológico para a bacia de Jequitinhonha.

Entre a Figura 78 e Figura 80 se percebe que os índices NS para o método proposto estão melhores em relação ao mesmo índice da média do *ensemble* do CPTEC para bacia do Jequitinhonha. Entre a Figura 81 e Figura 83 se percebe a quase equivalência entre o método e a média do *ensemble* GEFS, porem com leve vantagem para o método proposto.

A Tabela 23 apresenta as estatísticas: média, mediana, máximo e mínimo do índice NS para o método proposto e para a média do *ensemble hidrológico* previsto. Nesta tabela se verifica que o método melhora a média e a mediana do índice NS para a bacia do Jequitinhonha e ensemble CPTEC ou GEFS.

Para certificar que esta melhora na média dos índices NS não são apenas uma variação amostral do parâmetro dentro da mesma população foi realizado os testes estatísticos Z e T.

Tabela 23 - Estatística comparativa do Nash-Sutcliffe, Jequitinhonha

	CPTEC		GEFS	
	Método	CPTEC	Método	GEFS
Máximo	-2.22	-3.60	-3.09	-3.56
Média	-21.33	-24.03	-23.16	-23.73
Mediana	-18.55	-21.29	-20.35	-20.83
Mínimo	-84.29	-87.69	-87.57	-88.88

Ao aplicar o teste Z no caso de Jequitinhonha com utilização do *ensemble* do CPTEC a média do método foi considerada superior à média do *ensemble* com significância de 95%. O valor do Z foi de 2,18 e pela tabela da distribuição normal o Z_{limite} para 5% (unilateral) é de 1,645. Portanto a média do método é superior.

O teste T (*T of student*) também verifica se as médias são diferentes (ou uma superior a outra) estatisticamente falando. Entretanto a diferença é que no teste T as médias amostras não são consideradas as médias populacionais. Inicialmente utiliza-se o teste F para saber o grau de liberdade ao utilizar o teste T. O teste F verifica se as variâncias entre as amostras são diferentes ou iguais. O valor de F com a utilização do *ensemble* do CPTEC foi de 1,18 enquanto o F_{limite} retirado de tabela para grau de liberdade de 186 e 186 (tamanho das amostras) é de 1,3. Como o $F < F_{\text{limite}}$ as variâncias das duas amostras são iguais estatisticamente falando. Neste caso o grau de liberdade de 370 ($186 \cdot 2$) e com 95% de significância a tabela do T nos dá um T_{limite} de 1,646. O T calculado para as amostras foi de 1,602, portanto inferior ao limite. Neste caso a média dos NS do método não é considerada maior a média dos NS da média do *ensemble*.

Os mesmos testes foram realizados para o caso da utilização do GEFS e os resultados foram que a série de NS do método e da média do *ensemble* não são estatisticamente diferentes para este caso. Portanto verificou-se que apenas no caso da bacia do Jequitinhonha e utilizando o *ensemble* do CPTEC o método apresentou melhoras em relação à média do *ensemble*.

Considerando o resultado dos dois testes o método proposto (para Jequitinhonha e *ensemble* CPTEC) é superior no acaso analisado, pois passou pelo teste Z. Entretanto os valores indicam que em outros casos (outros períodos de tempo não analisados) isso não ocorre, pois não passou pelo teste T.

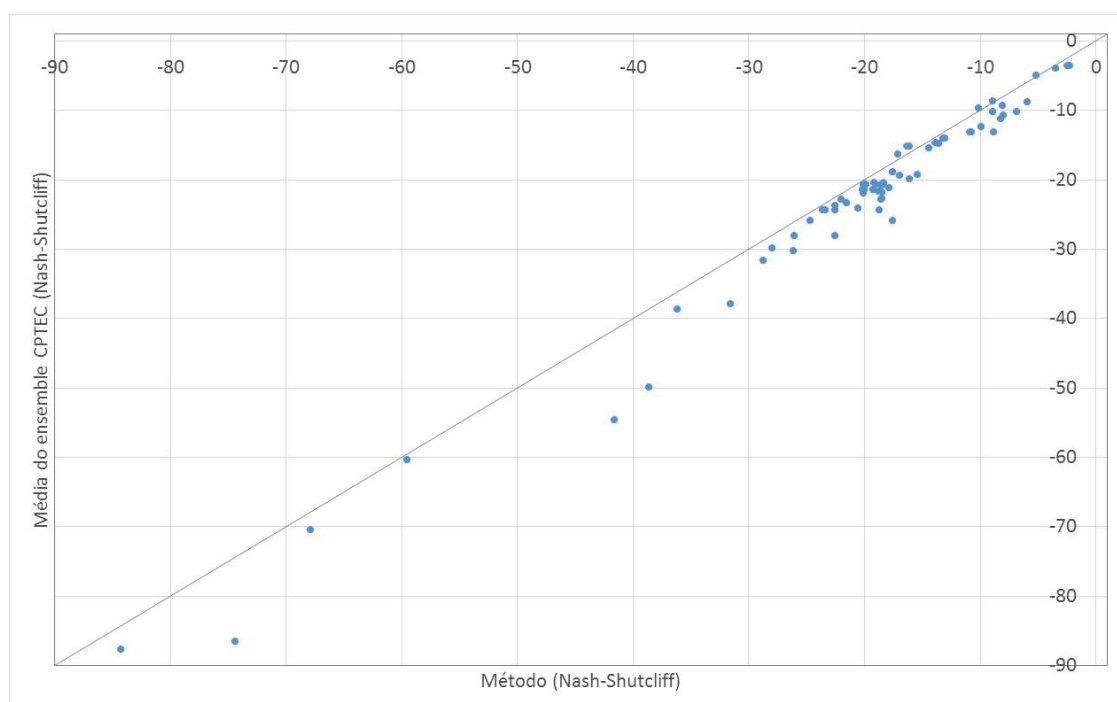


Figura 78 - Comparação entre os índices de Nash-Sutcliffe (NS) do método proposto e da média do *ensemble* hidrológico (pluv: CPTEC) para a bacia do Jequitinhonha.

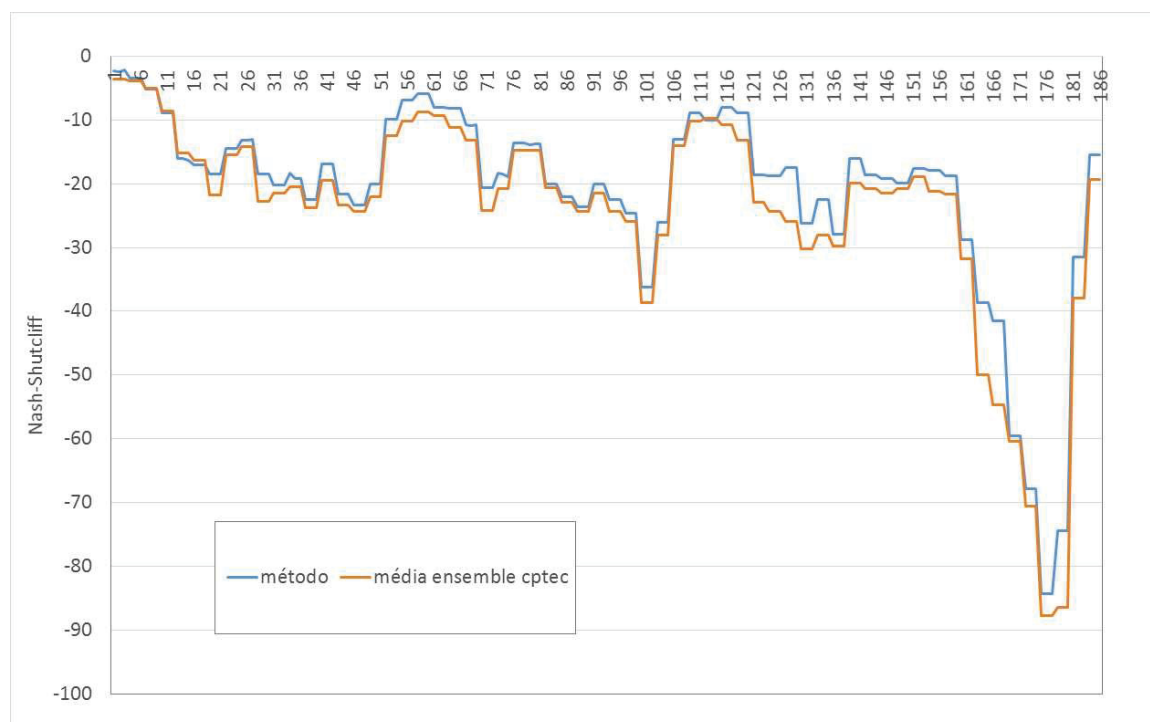


Figura 79 - Índices de NS em função das datas de previsões. Jequitinhonha e *ensemble* CPTEC.

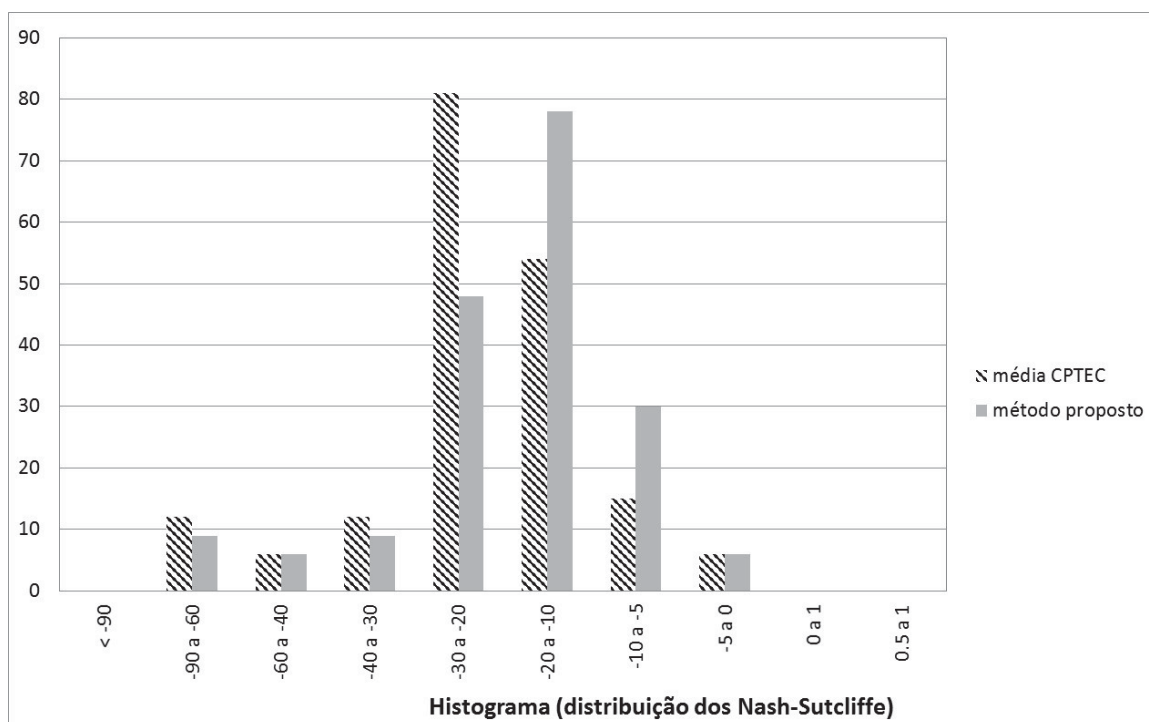


Figura 80 - Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia Jequitinhonha, *ensemble* CPTEC.

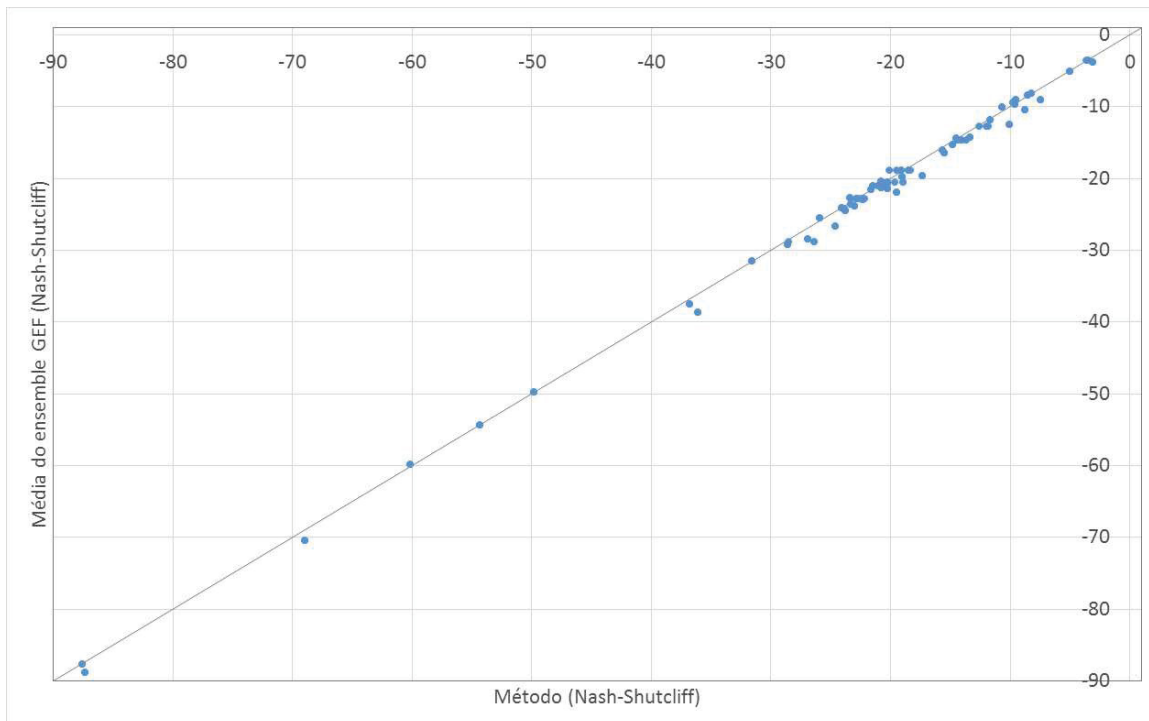


Figura 81 - Comparação entre os índices de Nash-Sutcliffe (NS) do método proposto e da média do *ensemble* hidrológico (pluv: GEFS) para a bacia do Jequitinhonha.

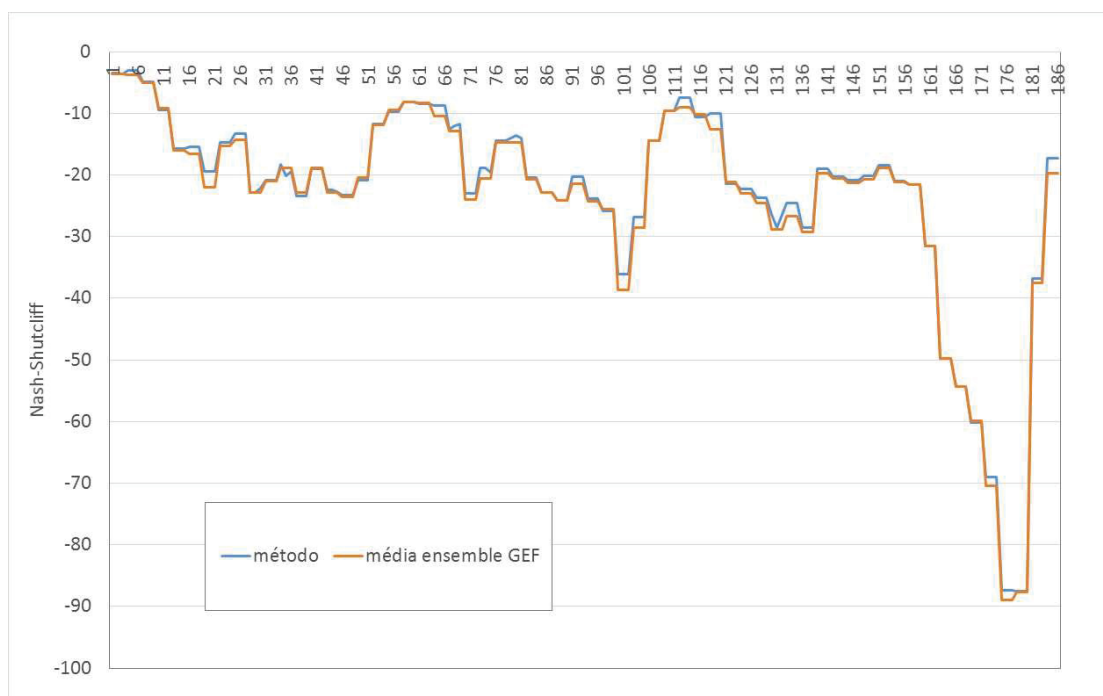


Figura 82 - Índices de NS em função das datas de previsões. Jequitinhonha e *ensemble* GEFS.

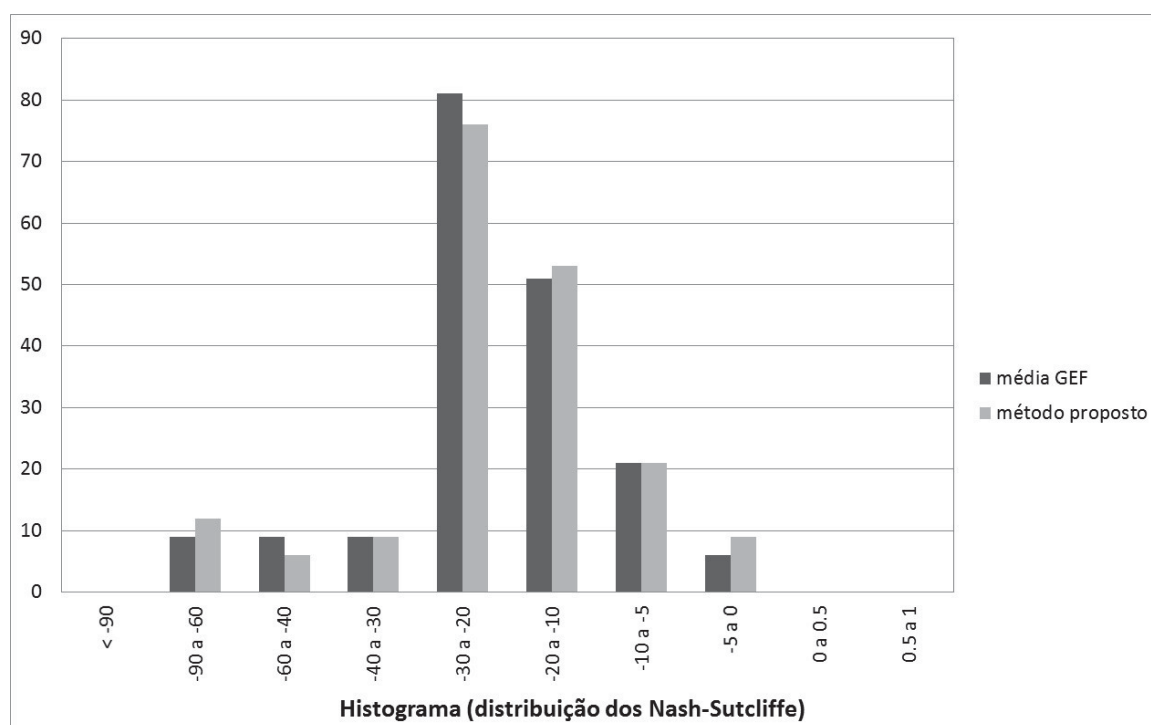


Figura 83 - Histograma do índice de Nash-Sutcliffe, bacia Jequitinhonha, *ensemble* GEFS.

6.4 RESUMO DOS RESULTADOS

No método de previsão proposto, a função de pertinência utilizada é a exponencial, pois foi a que melhor se adaptou conforme os resultados da calibração.

A série de índice de NS das previsões foram submetidas aos testes de hipóteses T e Z, e foi considerado sucesso do método proposto quando a média e a mediana do método foram melhores que a do ensemble hidrológico sem a utilização do método proposto.

Nas Tabela 24 a Tabela 26 abaixo apresentam-se resumos dos resultados da calibração e da aplicação do modelo proposto.

Tabela 24 – Resultado do método na Calibração (fuzificação da chuva)

Bacia Hidrográfica	Discretização da Chuva	Resultado
Itabapoana	6 horas	Sucesso em CPTEC, exponencial
Itabapoana	Diário	Sucesso em CPTEC, exponencial
Jequitinhonha	6 horas	Sucesso em CPTEC, GEFS exponencial
Jequitinhonha	Diário	Sucesso em CPTEC, GEFS exponencial

Tabela 25 - Resultado do método na previsão de chuva acumulada

Bacia Hidrográfica	Discretização da Chuva	Resultado
Itabapoana	6 horas	Sucesso: CPTEC (aplicado até 48 horas)
Itabapoana	Diário	Fracasso
Jequitinhonha	6 horas	Não testado
Jequitinhonha	Diário	Sucesso; GEFS (aplicado de 24 a 48 h)

Tabela 26 - Resultado do método na previsão de vazão

Bacia Hidrográfica	Discretização da Chuva	Resultado
Itabapoana	6 horas	Não testado
Itabapoana	Diário	Fracasso
Jequitinhonha	6 horas	Não testado
Jequitinhonha	Diário	Fracasso

Apesar do fracasso do método na previsão de vazões em Jequitinhonha utilizado-se o *ensemble* do CPTEC o método melhorou a previsão para o período

analisado, mais de acordo com o teste T esta melhora não é suficiente para afirmar que é uma melhora para outros períodos não analisados.

Nas Tabelas 24 a 26 o termo fracasso significa que o método proposto não é melhor que a média do *ensemble*. Entretanto o método proposto não pode ser considerado inferior à média do *ensemble*. Portanto o método pode ser considerado mais uma previsão possível. Apesar do método proposto ter sido inferior em vários momentos, em outras várias previsões o método foi superior à média do *ensemble*. A Figura 84 apresenta a previsão para a vazão afluente na UHE Rosal (bacia do Itabapoana) em 24/12/2011 onde o método proposto foi superior à média do *ensemble*. Nesta figura, as linhas tracejadas representam as precipitações (as chuvas observadas foram obtidas da rede telemétrica), e as contínuas representam as vazões. Pode-se ver que o volume da cheia pelo método proposto é mais próximo ao observado do que o volume proporcionado pela média do *ensemble*. Portanto o método pode ser utilizado na operação dos reservatórios como mais uma previsão possível sem desconsiderar a previsão obtida pela média do *ensemble*.

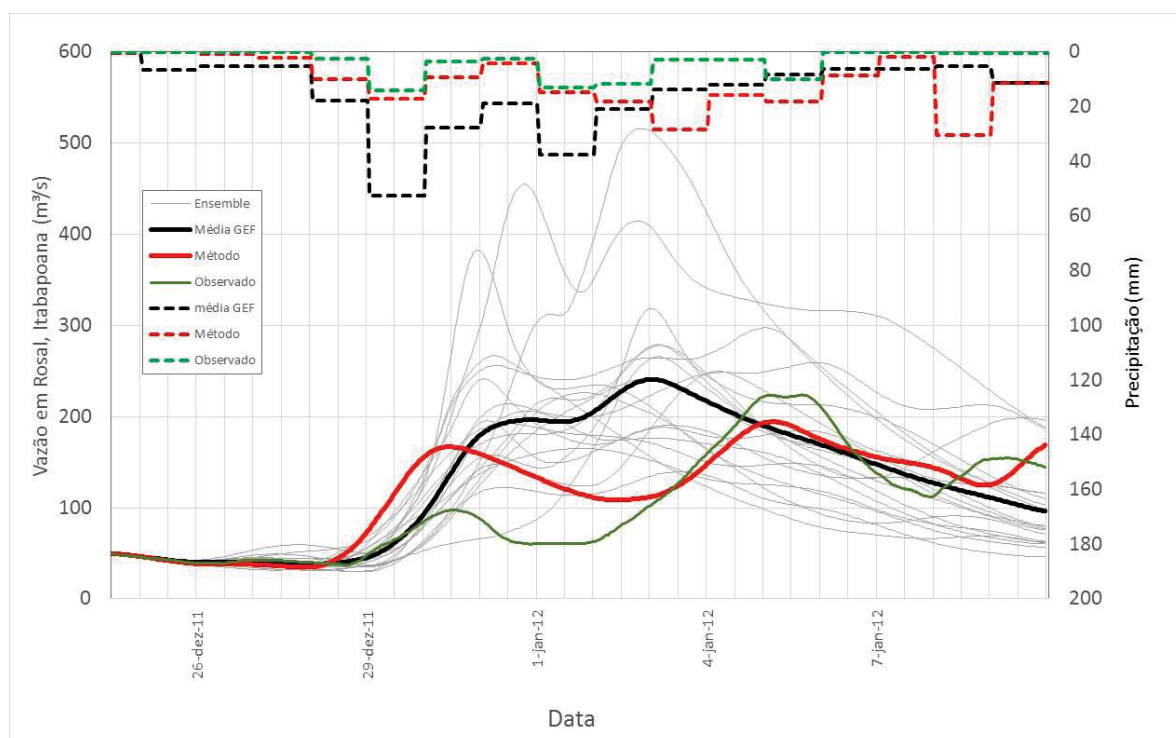


Figura 84 – Previsão de vazões em 24/12/2011 as 12:00.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo proposto consiste em obter um método de melhoria da previsão de vazões por *ensemble* pluviométrico. Utilizou-se o método proposto na *fuzificação* das precipitações diárias e a cada 6 horas.

A melhor função de pertinência entre as testadas foi a exponencial, sendo que a utilização da pertinência triangular e gaussiana originou uma piora nas previsões ou no mínimo igualou-se em relação à previsão pela média do *ensemble*.

O método obteve uma leve melhora na previsão da precipitação (acumulada de 6 horas e diária e pertinência exponencial) na fase de calibração em relação à média dos *ensembles* pluviométricos, exceto quando se utiliza o *ensemble* pluviométrico GEFS e chuvas diárias na bacia do Itabapoana. Na previsão de vazões com *fuzificação* das precipitações esta melhora não foi percebida claramente e apenas com a utilização do *ensemble* do CPTEC, *fuzificação* das precipitações diárias e na bacia do Jequitinhonha o método foi levemente superior à média do *ensemble* hidrológico correspondente. O Teste estatístico Z e teste estatístico T foram aplicados e verificou-se que esta melhora é apenas para o período analisado conforme teste Z. No caso geral (outros períodos no tempo) esta melhora não é suficiente para se afirmar que o método melhora a média dos *ensembles*, conforme teste T.

O método proposto não foi melhor que à média do *ensemble* para *fuzificação* das vazões porque as vazões observadas nas primeiras horas, após o instante da previsão meteorológicas, influencia (pelo método proposto) em todo o hidrograma previsto. Para bacias de médio e grande porte onde o tempo de concentração é maior que 12 horas (nos casos estudados 16 horas e 47 horas) este resultado não é vantajoso, pois nas primeiras horas as vazões não estão sendo influenciadas pela previsão pluviométrica e sim pelas chuvas ocorridas antes do tempo de concentração. O uso da *fuzificação* de vazões seria melhor após o término do tempo de concentração da bacia. Recomenda-se a realização de trabalhos futuros para avaliar a utilização do método para outras dimensões de bacia.

O método somente resultou melhor que a média do *ensemble*, conforme teste Z (mesmo não passando pelo teste T), na bacia do Jequitinhonha. Isso é um indício que o método se adequa melhor para bacias hidrográficas maiores e/ou com a utilização de *pixels* mais refinados dos *ensembles* pluviométricos (modelos

meteorológicos regionais ou de Mesoescala). O uso de modelos meteorológicos regionais e de Mesoescala devem ser testados em trabalhos futuros.

A leve superioridade apresentada pelo método proposto na fase de calibração não se refletiu totalmente nas vazões previstas. Esta leve melhora nas previsões de precipitações não foi maior que as incertezas na modelagem chuva-vazão e, portanto, esta vantagem não se refletiu nas vazões. Com o modelo proposto pretende-se de certa forma retirar a incerteza da condição inicial com a utilização da observação da precipitação (ou vazão) nos primeiros momentos após a previsão meteorológica mais não é retirada nem a incerteza de outras variáveis envolvidas nem a incerteza da estrutura matemática dos modelos meteorológicos e hidrológicos em si, por isso ainda não é suficiente para a melhoria substancial da previsão.

Verificou-se que a melhoria proporcionada pelo método proposto que apareceu na calibração não foi mais percebida após a utilização do ACP. Portanto, como recomendação para estudos futuros pode-se testar novos métodos de agrupamento de *ensembles* para a obtenção dos parâmetros L , a , b a serem utilizados. Neste estudo utilizou-se o ACP, entretanto existem inúmeros outros métodos e suas variações, entre eles o método de agrupamento Cluster. Para detalhes deste método pode-se consultar Everitt (1993).

Nesta tese não foi utilizada as técnicas de correção da tendenciosidade entre a previsão e as observações tanto do método proposto quanto do método da média do *ensemble*. Isto porque o objetivo era comparação entre os dois métodos. Uma recomendação para trabalhos futuros é a realização desta correção. Esta correção deve melhorar tanto o método proposto quanto a média do ensemble.

Dentre os métodos e modelos utilizados no método proposto, os modelos numéricos meteorológicos são os que tem mais margem para futuras melhorias, pois tem seu desenvolvimento mais recente. O modelo Sacramento (chuva x vazão) é bem consolidado e utilizado a muito tempo no meio científico. De qualquer maneira, em qualquer modelo os dados de entrada, que são geralmente dados observados, são uma fonte de incertezas. A melhoria dos sensores relacionados a medição das variáveis envolvidas no processo levará a diminuição das incertezas e conseqüentemente a melhoria de modelos de previsão de chuva e de vazão.

Os resultados do método proposto estão diretamente relacionados aos resultados dos modelos numéricos meteorológicos que geraram as previsões de

precipitações por *ensemble*. Ajustando-se melhor estes modelos espera-se uma melhora nos resultados do método proposto, principalmente se a melhora for na sequência temporal dos fenômenos meteorológicos que geram a sequência temporal de chuvas previstas. Isto porque, conforme a fórmula de agregação das regras difusas utilizada, a observação da chuva e as previsões pluviométricas dos membros do *ensemble* nas primeiras horas após a previsão meteorológica define, pelo método proposto, toda a sequência de vazões previstas. Nesta tese a lógica difusa foi, de certa forma, utilizada para considerar que: se algumas das previsões do *ensemble* estão acertando no começo das previsões estas são mais prováveis que as demais, ou seja estas continuaram a acertar até o horizonte da previsão.

A utilização da lógica difusa nesta tese originou uma nova previsão que não é mais provável que a média do *ensemble* hidrológico. A não melhoria da média do *ensemble* utilizando o método proposto, não pode desestimular a utilização da técnica da lógica difusa pois esta pode ser utilizada de maneiras diferentes e em diferentes etapas de uma previsão de vazões podendo resultar em diferentes performances.

O método proposto e/ou a utilização das previsões por *ensemble* pluviométrico (média do *ensemble* hidrológico) são adequados para um planejamento da operação do reservatório a médio prazo, ou seja, de 4 a 15 dias a frente. Para a operação do reservatório a curto prazo, ou seja, de algumas horas até 4 dias a frente aproximadamente (dependendo da dimensão da bacia hidrográfica) a melhor opção é a utilização de uma previsão que leva em conta vazões observadas em estações fluviométricas a montante do remanso da barragem e sua propagação hidrodinâmica até o eixo da barragem incluindo uma modelagem chuva x vazão apenas na bacia incremental entre as estações fluviométricas o local da barragem.

Os resultados apresentados nesta tese mostram que o método proposto não é superior à média do *ensemble* para as bacias hidrográficas do porte analisado. Apesar de não ser superior à média do *ensemble* o método proposto pode ser considerado equivalente em termos de performance à média do *ensemble*. Com isso, ele pode ser utilizado pelos operadores das barragens como mais uma possível previsão de vazão, sem descartar a previsão obtida pela média dos *ensembles*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEBE, A. J.; SOLOMATINE, D. P.; VENNEKER, R. G. W. Application of adaptive fuzzy rule-based models for reconstruction of missing precipitation events. **Hydrol. Sci. J.** 45(3), 425-436., 2000.
- ALPAYDIN, E. Introduction to Machine Learning. **Adaptive Computation and Machine Learning**, 2nd Edn., The MIT Press, Cambridge, 2010.
- ANDERSON, R. M.; KOREN, V. I.; REED, S. M. "Using SSURGO data to improve Sacramento model a priori parameter estimates". **Journal of Hydrology** 320(1), 103–116, 2006.
- ANDREOLLI, I. Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica. Dissertação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, dez 2003.
- ARAUJO, A.N.; GUETTER, A.K. Validação da Chuva Estimada por Satélite "CMORPH" na Modelagem Hidrológica do Alto Iguaçu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos-RBRH**, v.12, n.3, p.189-19, 2007.
- BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2010.
- BARDOSSY, A.; BOGARDI, I.; DUCKSTEIN, L. Fuzzy regression in Hydrology. **Water Resources Research** 26(7), 1497-1508, 1990.
- BERLATO, M.A; MOLION, L.C.B. Evaporação e evapotranspiração. Boletim técnico. Instituto de Pesquisas Agronômicas, IPAGRO. 95p. 1981.
- BEVEN, K. J. et al. Testing a Physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 69, p. 119-143, 1984
- BOUCHER, M. A.; TREMBLAY, D.; DELORME, L.; PERREAULT, L.; ANCTIL, F. Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems. **Journal of Hydrology** 416–417, (2012) 133–144, 2012.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, R. *Times series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-day, 1976.
- BRAGA, P. F. Jr. Geração e previsão de vazões através de modelos ARMA e ARIMA, **Curso de engenharia hidrológica**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de águas e energia elétrica, ABRH, 1983.

BROCHERO, D.; ANCTIL, F.; GAGNÉ, C. Simplifying a hydrological ensemble prediction system with a backward greedy selection of members – Part 1: Optimization criteria. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 15, 3307–3325, nov 2011.

BROWN, J. D.; DEMARGNE, J.; SEO, D. J., LIU, Y. The Ensemble Verification System (EVS): A software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations. **Environmental Modelling & Software** 25 (2010) 854–872. Fev 2010.

BYRD, R H; P LU; J. NOCEDAL. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization. SIAM. **Journal on Scientific and Statistical Computing** 16 (5): 1190-1208. 1995.

COPASA. Equações de chuvas no estado de Minas Gerais. **Universidade Federal de Viçosa**. 2001.

CHEN, Y. H. Mathematical modelling of water and sediment routing in natural channels, **PhD dissertation**, Departament of civil engineering, Colorado State University, USA, 1973.

CHEN, S. T. Application of grey prediction model on runoff forecasting. MSc Thesis, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan (in Chinese), 1998.

CHOU, S. C. Previsão do tempo e clima sazonal por *ensemble*. Apresentação realizada em Workshop no IPH, UFRGS, 2015.

COPPOLA, E. A.; DUCKSTEIN, L.; DAVIS, D. Fuzzy rule-based methodology for estimating monthly groundwater recharge in a temperate watershed. **J. Hydrol. Engng ASCE** 7(4), 326.335, 2002.

CRC for Catchment Hydrology. “Rainfall Runoff Library – User Guide”. Available in: <www.tolkit.net.au/rrl>. Accessed in december of 2013. (2004).

DELTARES. (2013). “SOBEK User Manual”. Available in: <<http://delftsoftware.wildelft.nl/>> Accessed in december of 2013.

DEKA, P.C., CHANDRAMOULI, V. Fuzzy neural network modeling of reservoir operation. 2009.

DINKU, T.; CECCATO, P.; CONNOR, S.J. Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over Mountainous Regions of Africa and South America. In: Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, M. Gebremichael and F. Hossaim (eds.), Springer, p.193-204, 2010.

DUBROVIN, T.; JOLMA, A.; TURUNEN, E. Fuzzy model for real-time reservoir operation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, January/February 2002. Pg 66/73, 2002.

ENGMAN, E.T. Chapter 24: Remote Sensing. In: Handbook of Hydrology, David Maidment, editor, McGraw-Hill, New York, 1993.

EVERITT, B. S. **Cluster analysis**. Heinemann Educational Books. London: Academic Press. 3ª edição, 1993. pg.170

FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A.B.; PAZ R.L.; AMORIM A.O.. Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos. Documento 263. EMBRAPA. ISSN 1678-9644. 44p. dezembro 2010.

FORTIN, J.P.; MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C.; VILLENEUVE, J.P. HYDROTEL, un modele hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. **Revue des Sciences de l'Eau** 8, 97–124, 1995.

FORTIN, V.; FAVRE, A.C.; SAÏD, M. Probabilistic forecasting from ensemble prediction systems: improving upon the best-member method by using a different weight and dressing kernel for each member. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 132, 1349–1369, 2006.

FRANZ, K. L.; HOGUE, T. S. Evaluating uncertainty estimates in hydrologic models: borrowing measures from the forecast verification community. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 15, 3367–3382, 2011. Nov 2011.

FREITAS, C. Uso de técnicas de classificação de dados na operação de sistema de reservatórios de usinas hidrelétricas durante cheias. Tese do Programa de pós-graduação de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, 2016.

FREITAS, C.; KAVISKI, E. Desenvolvimento de Modelo de Previsão de Vazão para o rio Iguaçu Utilizando Lógica Fuzzy. In: **IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. Florianópolis-SC, 2014.

FU, G. A fuzzy optimization method for multicriteria decision making: An application to reservoir flood control operation. 2008.

GALAMBOSE, A.; ÖZELKAN, E.C.; DUCKSTEIN, L.; BOGARDI, I. A fuzzy rule-based model for precipitation analysis under climate change in the US Southwest. *Proceeding of American Meteorological Society 99-14 Hydrology Conference*, 10-15 January, Dallas, TX, pp. 29-30, 1999.

GAZETA DO POVO. Reportagem em gazetadopovo.com em 26/06/2015.

GERLINGER, K.; DEMUTH, N. The Flood forecast model LARSIM: application experience and evaluation of operational runoff forecasts in the Moselle basin. Slide de apresentação em PowerPoint, março 2011.

GILBERTONI, R. F. C. Regionalização de parâmetros hidrológicos utilizando análise difusa. Dissertação do Programa de pós-graduação de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, 2002.

GLOBO. Reportagem em Globo.com na edição de 01/02/2015.

GLOBO. Reportagem em Globo.com na edição de 08/05/2015, 2015a.

GOLDING, B.W. Quantitative precipitation forecasting in the UK. **Journal of Hydrology**, 239, p.286–305, 2000.

GOMES, J.; MINE, M. R. M. Estimativa de parâmetros de modelos hidrológicos utilizando o filtro de Kalman. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, volume 3, n.2, Abr/Jun 1998 pg 67-86

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. "Macro-scale hydrological modeling – a scandinavian experience." *In*: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century – reports from the World', Tokyo. Anais. Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p.38-45. (Disponível em:< https://itia.ntua.gr/hsj/46/hysj_46_06_0963.pdf>), 2000.

GU, Q. L.; YANG, X. H.; YANG, S. S.; ZHAO, T. B. Fuzzy decision-making model based on dynamic programming and its application in flood control. 2012.

HAMED, BASIL. Fuzzy Logic Control, Lect 5 Fuzzy Logic Control. Electrical Engineering. Islamic University of Gaza. em <http://slideplayer.com/slide/4858990/>. Consultado pela internet em 2016.

HAPUARACHCHI, H.A.P.; Q. J. WANG; PAGANO, T. C. A review of advances in flash flood forecasting. **Hydrological Processes**, v.25, p.2771–2784, 2011.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. Applied Multivariate Statistical Analysis. Prentice Hall, 1998. pgs 458 a 494. 1998.

JOYCE, R.J.; JANOWIAK, J.E.; ARKIN, P.A.; XIE, P. CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. **J. Hydrometeor**, 5, p.487–503, 2004.

JOYCE, R.J.; XIE, P.; YAROSH, Y.; JANOWIAK, J.E. CMORPH: A "Morphing" Approach for High Resolution Precipitation Product Generation. *In*: Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, M. Gebremichael and F. Hossaim (eds.), Springer, p.23-37, 2010.

KALMAN, R.E. (1960). «A new approach to linear filtering and prediction problems» (PDF). *Journal of Basic Engineering*. 82 (1): 35–45.

KAUFMAN, A.; GUPTA, M. M. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

KAVISKI, E.; CUNHA, L. M.; GIBERTONI, R. F. C. "Método de desagregação utilizando séries de Fourier". *In*: Simpósio Nacional de Recursos Hídricos. Maceió, 2005.

KELMAN, J. Controle de Cheias e Aproveitamentos Hidrelétricos, Cheias e aproveitamentos hidrelétricos. ABRH: **Revista Brasileira de Engenharia (RBE)**, 175p, Rio de Janeiro, 1987.

KELMAN, J. Modelos estocásticos no gerenciamento dos recursos hídricos. ABRH: **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**, capítulo 4, 1987a.

KHAN, M.H. Muskingum flood routing model for multiple tributaries. **Water Resour. Res.** 29(4), 1057.1062, 1993.

KOREN, V.I.; SMITH, M.; WANG, D.; ZHANG, Z. "Use of Soil Property Data in the Derivation of Conceptual Rainfall-Runoff Model Parameters" American Meteorological Society 15th Conference on Hydrology, Long Beach, CA, January 9-14, 2000.

KRAU, S. Présentation générale de SODAD, Super Outil D'Aide la Décision. Technical Report. IREQ-2005-077, 2005.

KRAUSKOPF Neto, R. Atualização de modelos chuva-vazão-propagação com estimadores de estado. Dissertação de Mestrado, UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, Brasil. 2005.

LACTEC e DELTARES. "Implantação de Sistema para Acoplamento de Modelos e Informação Telemétrica Visando à Otimização da Operação de Reservatórios em Tempo Real, com Foco no Controle de Cheias", P&D para a CEMIG, Relatório Técnico nº 08: Calibração hidrológica para as bacias hidrográficas do grupo 2. 2014.

LACTEC e DELTARES. "Implantação de Sistema para Acoplamento de Modelos e Informação Telemétrica Visando à Otimização da Operação de Reservatórios em Tempo Real, com Foco no Controle de Cheias", P&D para a CEMIG. Relatório Final. 2017.

LIMA H. V. C; LANNA A. E. L. Modelos para operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos / ABRH – Vol.10, nº3 (2005)**, Porto Alegre/RS, Brasil, 2005.

LIMA, H. V. C. Análise da operação de sistemas de reservatórios utilizando lógica difusa, redes neurais artificiais e sistemas neuro-difusos. Tese de doutorado na UFRGS, Porto Alegre. 2006.

MCCARTHY, G.T. The unit hydrograph and flood routing, presented at Conf. North Atl. Div., U.S. Corps Eng., Jun 1938.

MELLER, A. Previsão de Cheias por conjunto em curto-prazo. Tese de doutorado. 233 páginas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. IPH, 2012.

MINE, M. R. M. Modelos estocásticos lineares para previsão de cheias em tempo-real. Dissertação de Mestrado, USP-Universidade de São Paulo, 1984.

MINE, M. R. M. Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Maio 1998.

MOEINI, R.; AFSHAR, A.; AFSHAR, M. H. Fuzzy rule-based model for hydropower reservoirs operation. 2011.

MOTA, R.S. Meteorologia agrícola. São Paulo, Nobel. 376p. 1975.

MOUSAVI, S. J.; KARAMOUZ, M.; MENHADJ, M. B. **Journal of Water Resources Planning and Management** @ ASCE / November/December, 2004.

O'DONNELL, T. A direct three-parameter Muskingum procedure incorporating lateral inflow. **Hydrol. Sci. J.** 30(4), 479-496, 1985.

OLSSON, J.; LINDSTROM, G. Evaluation and calibration of operational hydrological ensemble forecasts in Sweden, **Journal of Hydrology** (2008) 350, 14– 24, 2008.

ÖZELKAN, E. C. Multi-objective fuzzy regression applied to the calibration of conceptual rainfall-runoff models. Unpublished Phd dissertation, The University of Arizona, Systems and Industrial Engineering Department, Tucson, Arizona, 1997.

ÖZELKAN, E. C.; DUCKSTEIN, L. Fuzzy Conceptual rainfall-runoff models. **Journal of Hydrology** 253 (2001) 41-68, 2001.

PANIGRAHI, D. P.; MUJUMDAR, P. P. Reservoir operation modelling with fuzzy logic. **Water Resour. Manage.** 14(2), 89-109, 2000.

RASO, L.; SCHWANENBERG, D.; SCHRUFF, T.; FAILACHEN, N. Tree-based model predictive control for optimizing hydro power production and floods. 10th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2012, Hamburg, Germany, 2012.

RASO, L.; GIESEN, V.; STIVE, P.; SCHWANENBERG, D.; OVERLOOP, P. J. Tree structure generation from ensemble forecasts for real time control. **Hydrol. Process.** 27, 75–82 (2013). Published online 26 September 2012 in Wiley Online Library, 2013.

RENNER, M.; WERNER, M. G. F.; RADEMACHER, S.; SPROKKEREEF, E. Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine, **Journal of Hydrology** 376 (2009) 463–475, 2009.

RIPPL, W. The Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply, **Proc. Instn. Civil Engrs.**, v.71, p.270-278, 1983.

ROULSTON, M.S.; SMITH, L.A. Combining dynamical and statistical ensembles. *Tellus* 55A, 16–30, 2003.

RUSSELL, S. O.; CAMPBELL, P. F. Reservoir operating rules with fuzzy programming. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 3(122):165-170, maio/jun., 1996.

SABOIA, J.P.J; Lipski, B.; Tavares, M. H.; Kan, A. Agrupamento de bacias hidrográficas de reservatórios de usinas hidrelétricas utilizando análise multivariada. **XXII Seminário Nacional de produção e transmissão de energia elétrica**. 13 a 16 de outubro de 2013. Brasília.

SALAS, J. D.; BOES, D. C.; SMITH, R. A. Estimation of Arma models with seasonal parameters, **Water Resources Research**, vol18, nº4, 1982.

SCOFIELD, R.A.; KULIGOWSKI, R.J. Satellite Precipitation Algorithms for Extreme Precipitation Events. In: Measuring Precipitation from Space, Levizzani et al. (eds.), EURAINSAT and the Future, p.485–495, 2007.

SILVA, M.A.V. Evapotranspiração em cultura irrigada no seminário submédio São Francisco. 97p. Tese. (Mestr.) São José dos Campos, INPE, 1977.

TAKAGI, T; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, SMC-15, n. 1, p. 166-132, Jan 1985.

TAVARES, L. V.; KELMAN, J. A Method to Optimize the Flood Retention Capacity for a Multi-Purpose Reservoir in Terms of the Accepted Risk., **Journal of Hydrology**, 81, 1985.

TIGGE. <http://dataset/data/tigge/levtype=sfc/type=cf>. Acessado em 2016.

UFRGS- <https://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/>. Acessado em 2014.

Van OVERLOOP, P. –J. Model Predictive Control on Open Water Systems. PhD Thesis, University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006.

VELÁZQUEZ, J. A.; PETIT, T.; LAVOIE, A.; BOUCHER, M. A.; TURCOTTE, R.; FORTIN, V.; ANCTIL, F. An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 13, 2221–2231, 2009, Nov 2009.

XUAN, Y.; CLUCKIE, I.D.; WANG, Y. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilizing short-range rainfall prediction. **Hydrology and Earth Systems Sciences**, 13, p.293–303, Mar 2009.

WAITT, F.W.F. Studies of Droughts in the Sydney Catchment Areas, **Journal of the Institution of Engineers**, Australia, 17(4-5): 90-97, 1945.

WERNER, M.; SCHELLEKENS, J.; GIJSBERS, P.; DIJK, M.; AKKER, O.; HEYNERT, K. The Delft-FEWS flow forecasting system. **Environmental Modelling & Software**, pg. 1-13, 2012.

WU L.; SEO D. J.; DEMARGNE J.; BROWN J. D.; CONG S.; SCHAAKE J. Generation of ensemble precipitation forecast from single-valued quantitative precipitation forecast for hydrologic ensemble prediction. **Journal of Hydrology** 399 (2011) 281–298. Jan de 2011.

YEN, B. B. Open Channel Flow Equations. ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, vol 99, maio de 1975.

YU, P. S.; CHEN, C. J.; CHEN, S. J. Application of grey and fuzzy methods for rainfall forecasting. **J. Hydrol. Eng.** ASCE 5(4), 339.345, 2000.

YU, P. S.; CHEN, C. J.; CHEN, S. J.; LIN, S. C. Application of grey model toward runoff forecasting. **J. Am. Water Resour. Assoc.** 37(1), 151.166, 2001.

YU, P-S.; CHEN, S-T. Updating real-time flood forecasting using a Fuzzy rule-based Model, **Hydrological Sciences Journal**, 50:2, -278, 2005.

ZABCZYK, J. Mathematical Control Theory: An Introduction. Boston, MA: Birkhäuser, 1993.

ZADEH, L. A. "Fuzzy sets". Information and Control 8 (3): 338–353, 1965.

ZHAO, T.; CAI, X.; YANG, D. Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. **Advances in Water Resources** 34 (2011) 495–504, 2011.

ZHU, C; R H BYRD; J NOCEDAL. L-BFGS-B: Algorithm 778: L-BFGS-B, FORTRAN routines for large scale bound constrained optimization. ACM Transactions on Mathematical Software 23 (4): 550-560. 1997.

APÊNDICE A

Neste apêndice são apresentadas figuras complementares (itens 9.1 a 9.4) dos demais resultados da calibração do método que não comentados no texto principal. No item 9.5 deste apêndice são mostrados os valores dos parâmetros do método após a calibração e agrupamento pelo método do ACP para casos não apresentados no texto principal.

FIGURAS DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS. FUZIFICAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DIÁRIA (ITABAPOANA)

Entre a Figura 1A e Figura 3A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas, com função de pertinência exponencial para o rio Itabapoana. Na Figura 1A se nota que o método é inferior à média do *ensemble* do ECMWF, pois há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45°. A Figura 2A mostra uma certa igualdade entre os métodos quando se utiliza o *ensemble* do GEFS. A Figura 3A mostra a superioridade do método proposto quando se utiliza o *ensemble* do CPTEC, pois há mais dados na parte inferior à reta de 45°.

Entre a Figura 4A e Figura 6A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas, com função de pertinência gaussiana para o rio Itabapoana. Nestas três figuras percebe-se claramente a inferioridade do método proposto em relação à média do *ensemble* do ECMWF, GEFS e CPTEC respectivamente. Isto porque há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45° nos três gráficos.

Entre a Figura 7A e Figura 9A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas, com função de pertinência triangular para o rio Itabapoana. Na Figura 7A se nota que o método é inferior à média do *ensemble* do ECMWF, pois há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45°. A Figura 8A mostra inferioridade do método proposto para os índices NS melhores quando se utiliza o *ensemble* do GEFS. A Figura 9a mostra a superioridade do método proposto quando se utiliza o *ensemble* do CPTEC, pois há mais dados na parte inferior à reta de 45°.

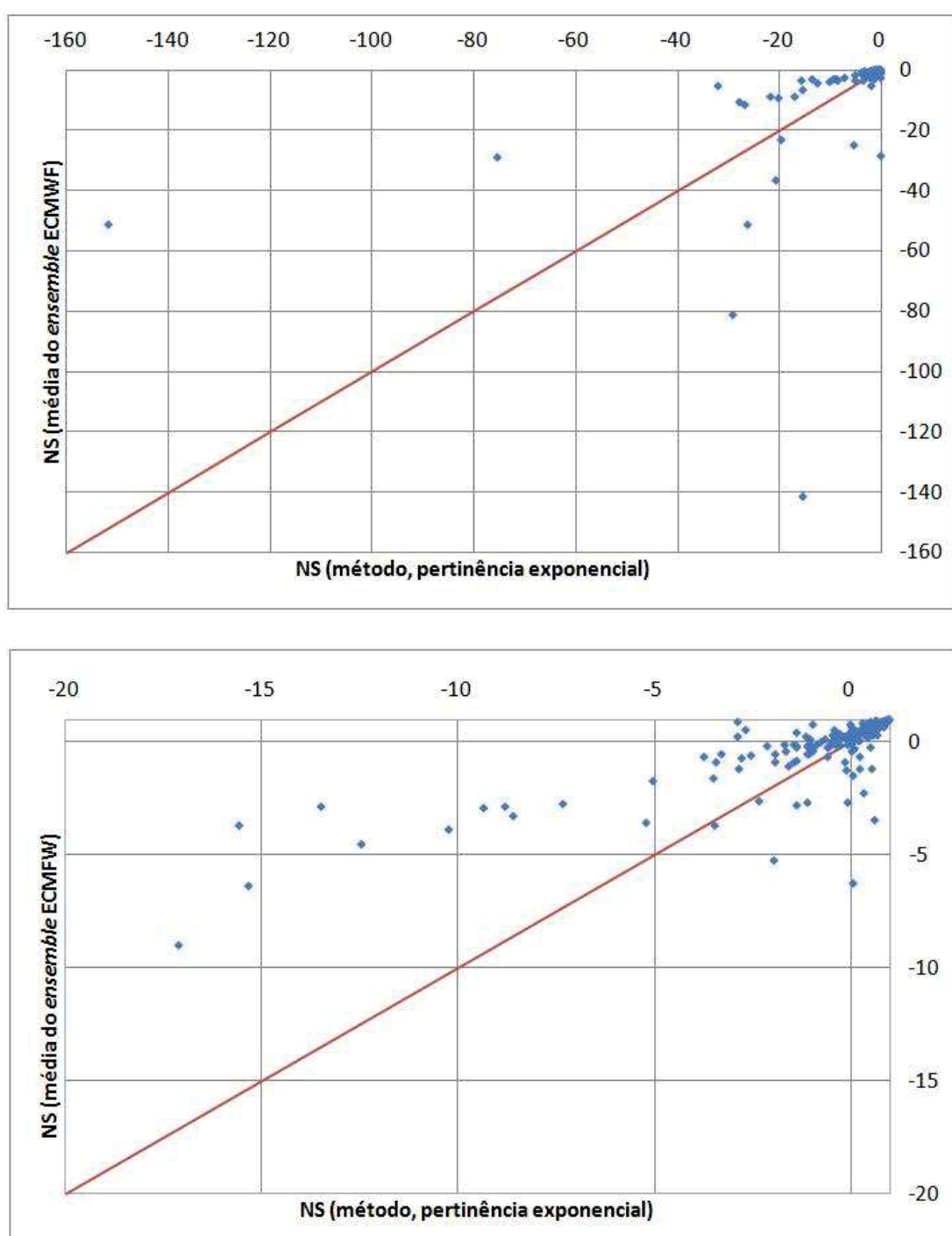


Figura 1A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF) para chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

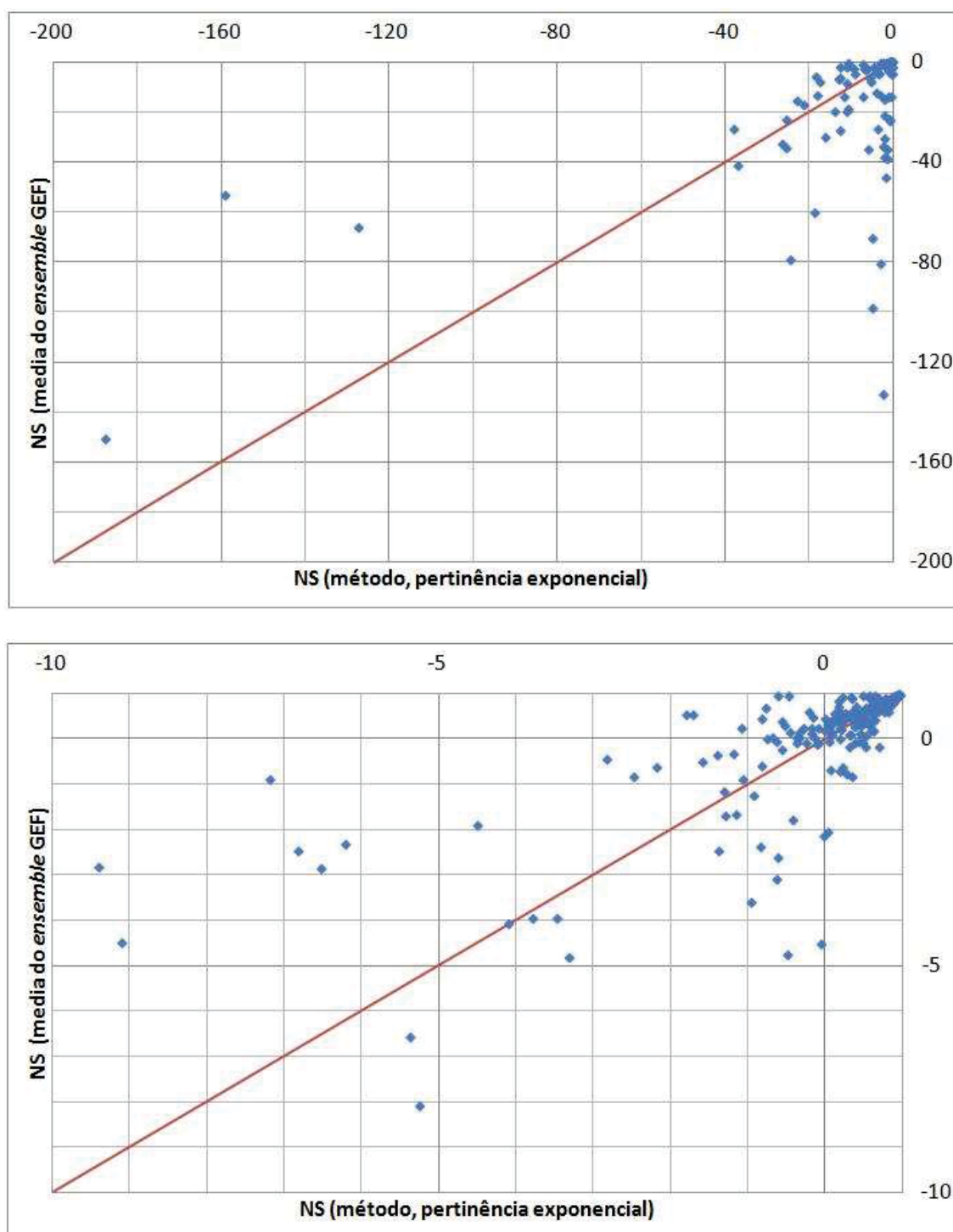


Figura 2A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS) para chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

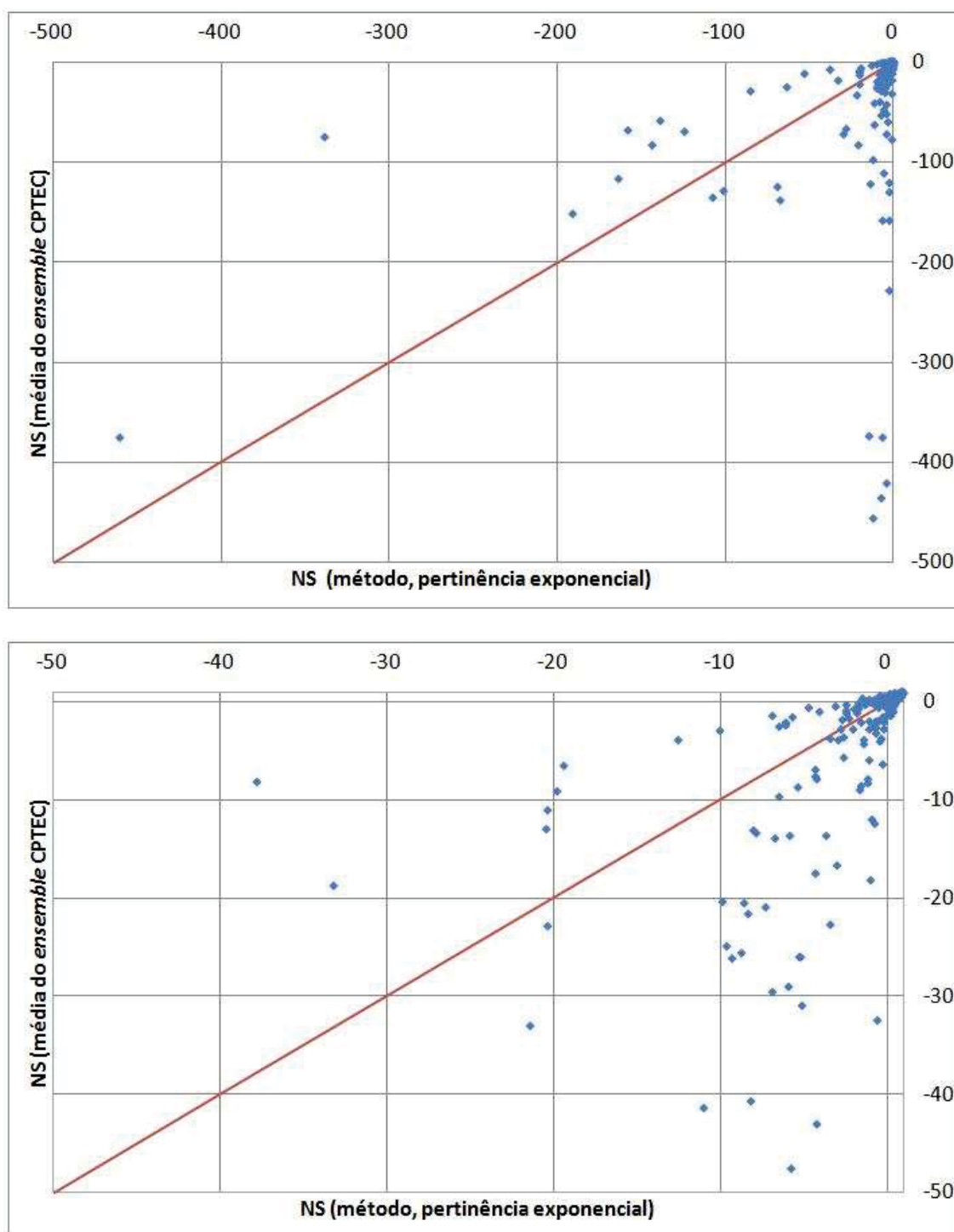


Figura 3A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC) para chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

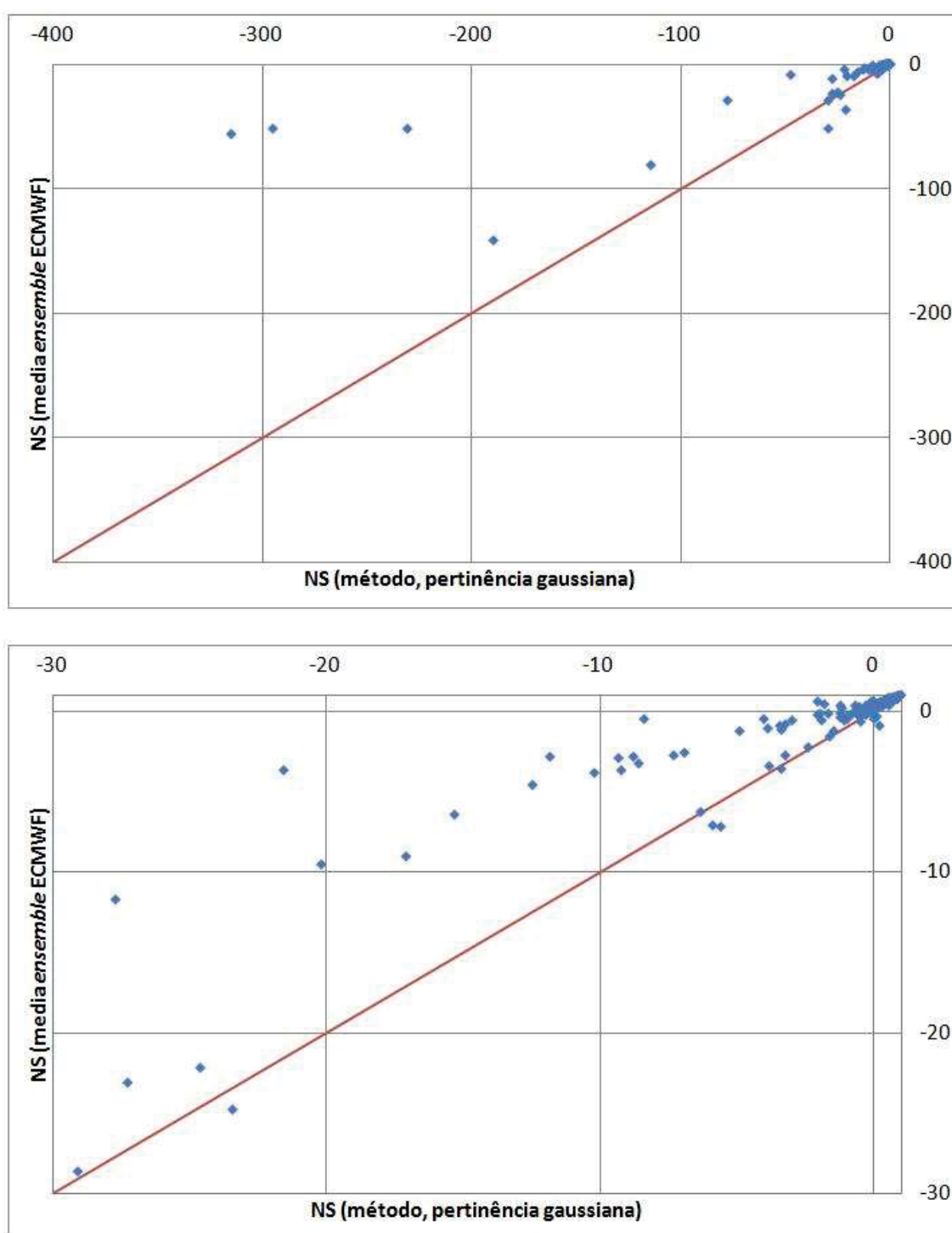


Figura 4A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF), chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

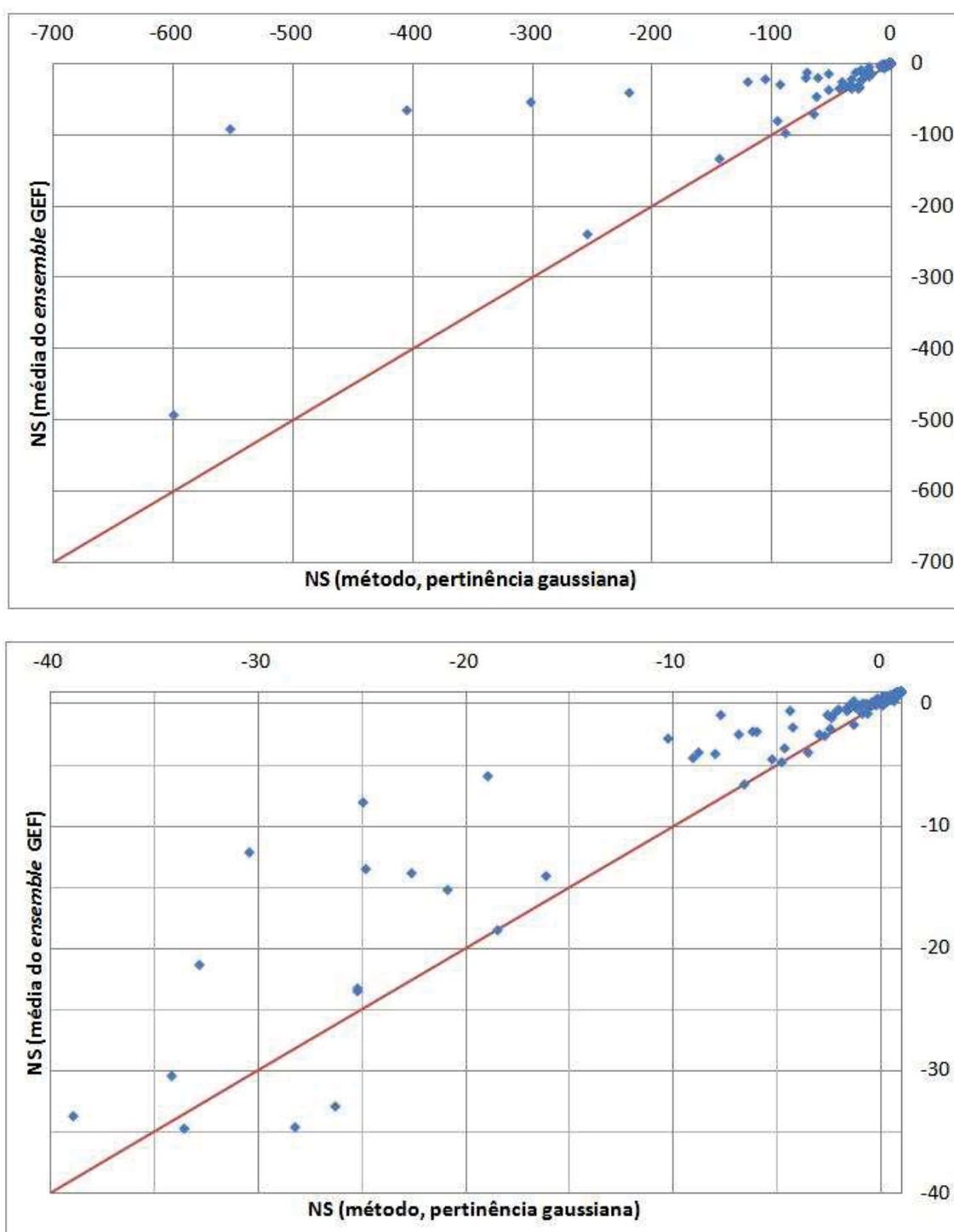


Figura 5A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS), chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

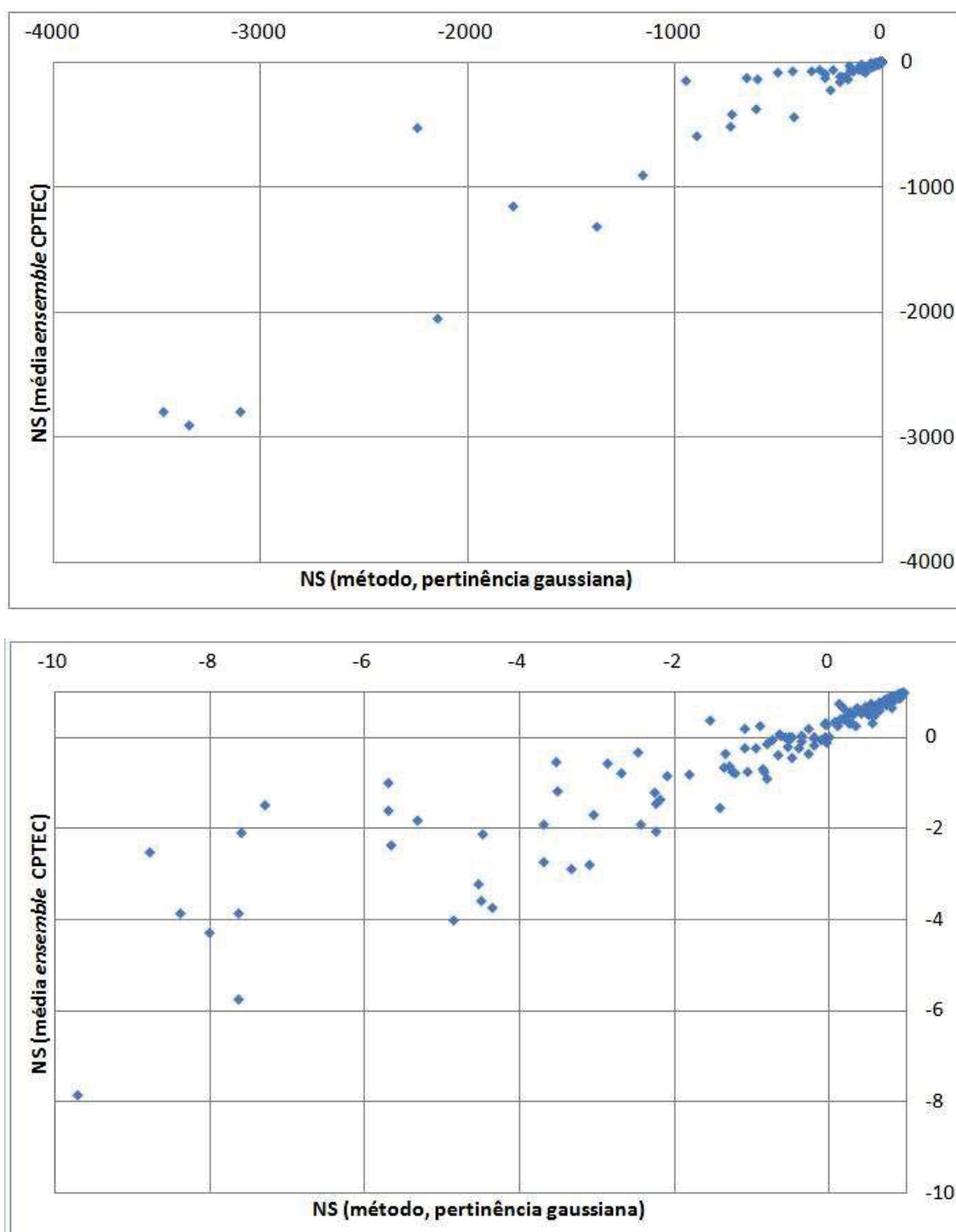


Figura 6A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC), chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

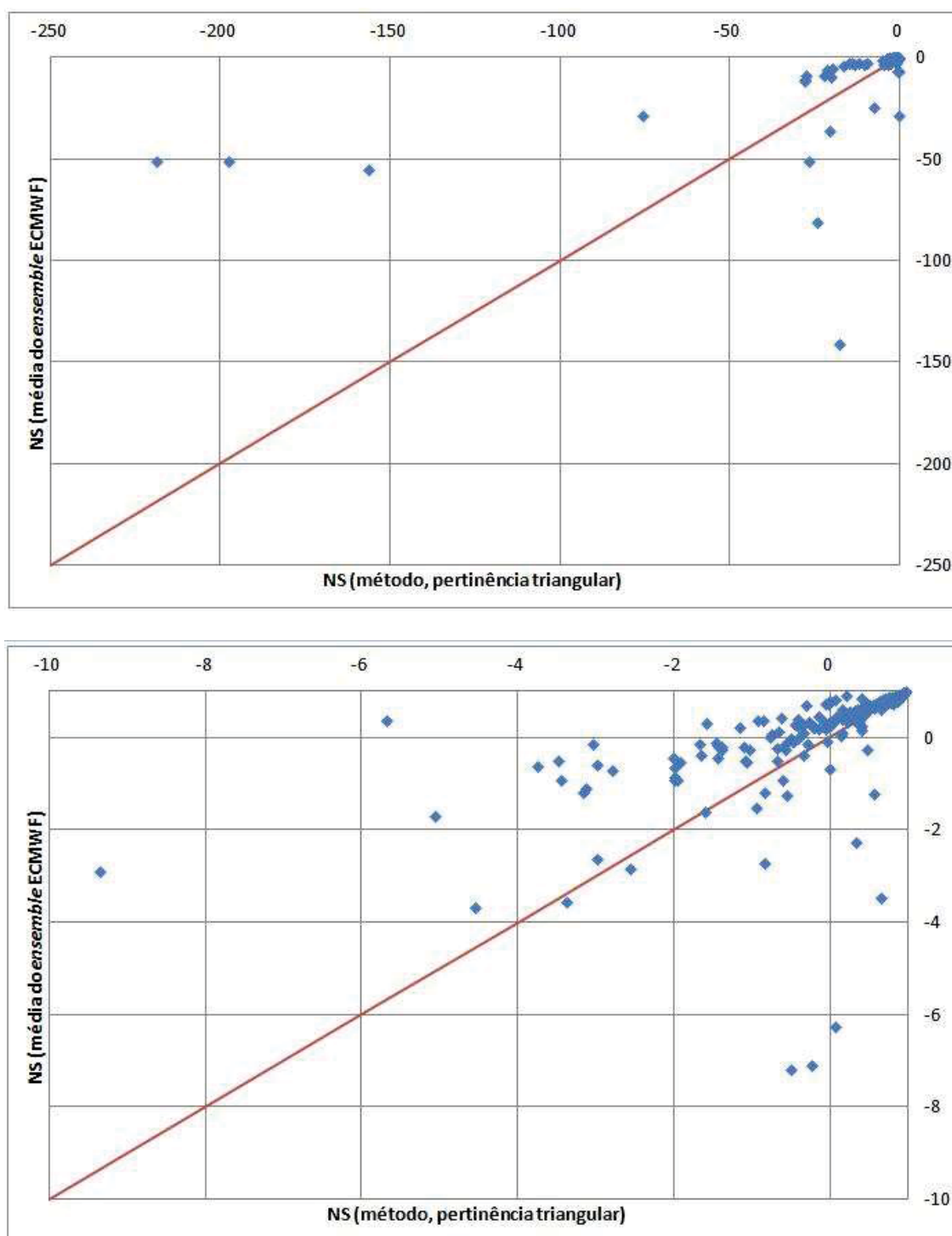


Figura 7A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF), chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

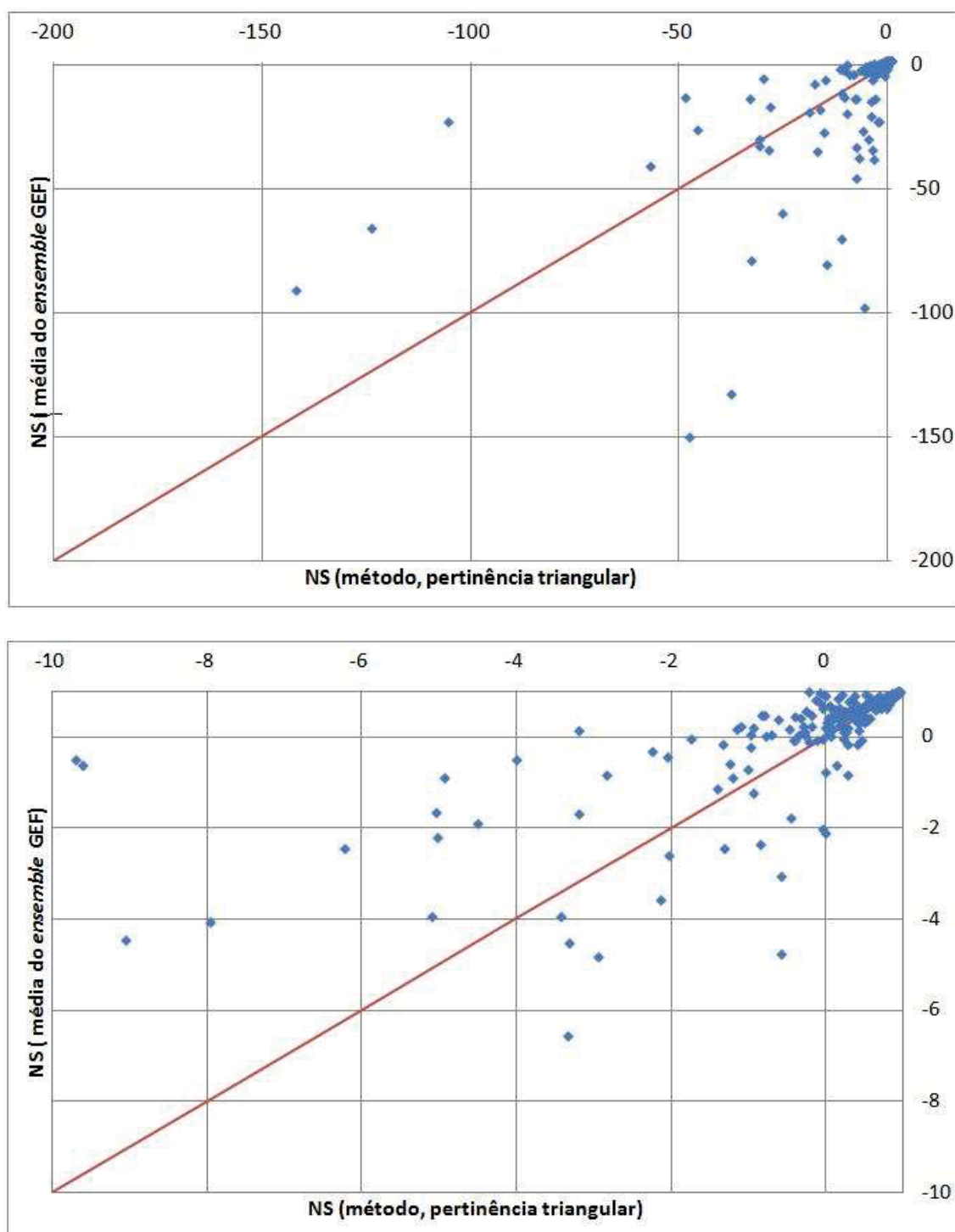


Figura 8A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS), chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

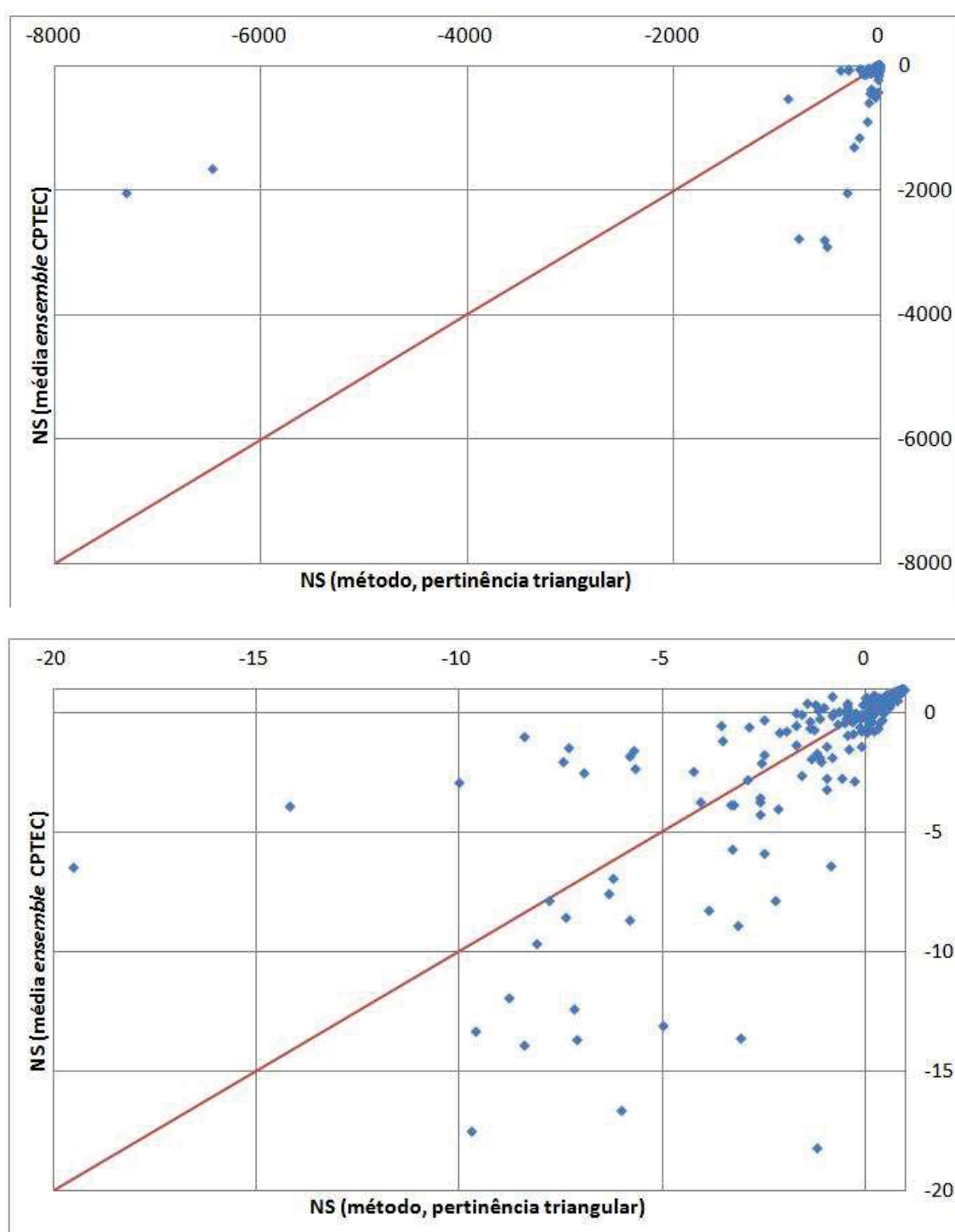


Figura 9A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC), chuva diária e bacia do Itabapoana. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

FIGURAS DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS. FUZIFICAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DIÁRIA (JEQUITINHONHA)

Entre a Figura 10A e Figura 12A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas, com função de pertinência exponencial para o rio Jequitinhonha. Na Figura 10A se nota que o método é inferior à média do *ensemble* do ECMWF para índices NS melhores, pois há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45° no gráfico inferior, apesar disso o método foi superior para os piores índices NS (gráfico superior). A Figura 11A mostra uma certa igualdade entre os métodos (gráfico inferior) quando se utiliza o *ensemble* do GEFS, apesar do método melhorar as piores previsões (gráfico superior). A Figura 12A mostra a superioridade do método proposto, pois há mais dados na parte inferior à reta de 45° (para o caso do uso do *ensemble* do CPTEC)

Entre a Figura 13A e Figura 15A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas, com função de pertinência gaussiana para o rio Jequitinhonha. Nestas três figuras percebe-se claramente a inferioridade do método proposto em relação à média do *ensemble* do ECMWF, GEFS e CPTEC respectivamente. Isto porque há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45° nos três gráficos.

Entre a Figura 16A e Figura 18A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas, com função de pertinência triangular para o rio Jequitinhonha. Na Figura 16A se nota que o método é inferior à média do *ensemble* do ECMWF para os melhores índices NS, pois há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45° (gráfico inferior). A Figura 17A mostra que ganho se utiliza o *ensemble* do GEFS ocorre equivalência entre os métodos para os melhores índices NS (gráfico inferior) e uma superioridade do método proposto para os piores índices NS (gráfico superior). O mesmo ocorre quando se utiliza o *ensemble* do CPTEC como mostra a Figura 18A.

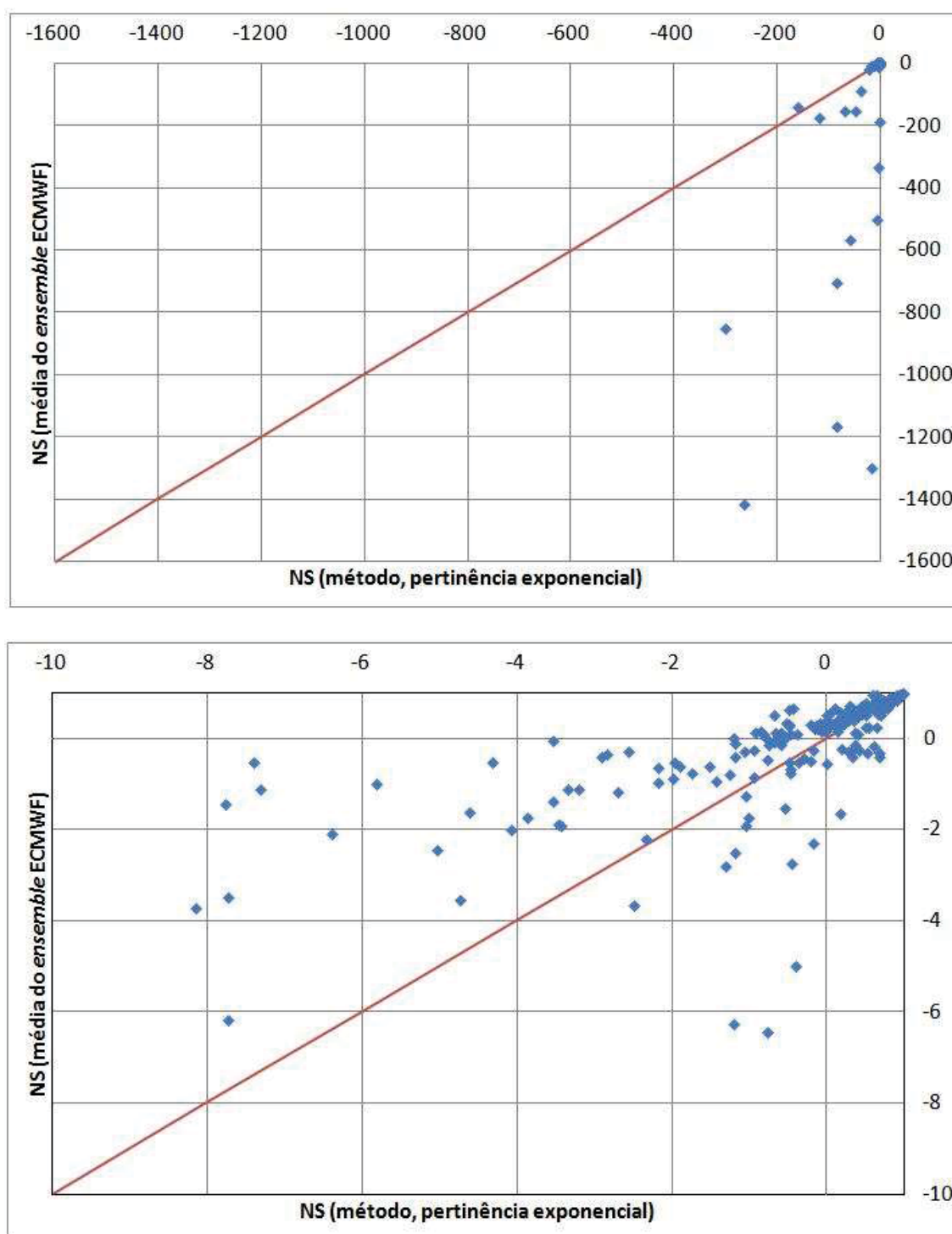


Figura 10A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

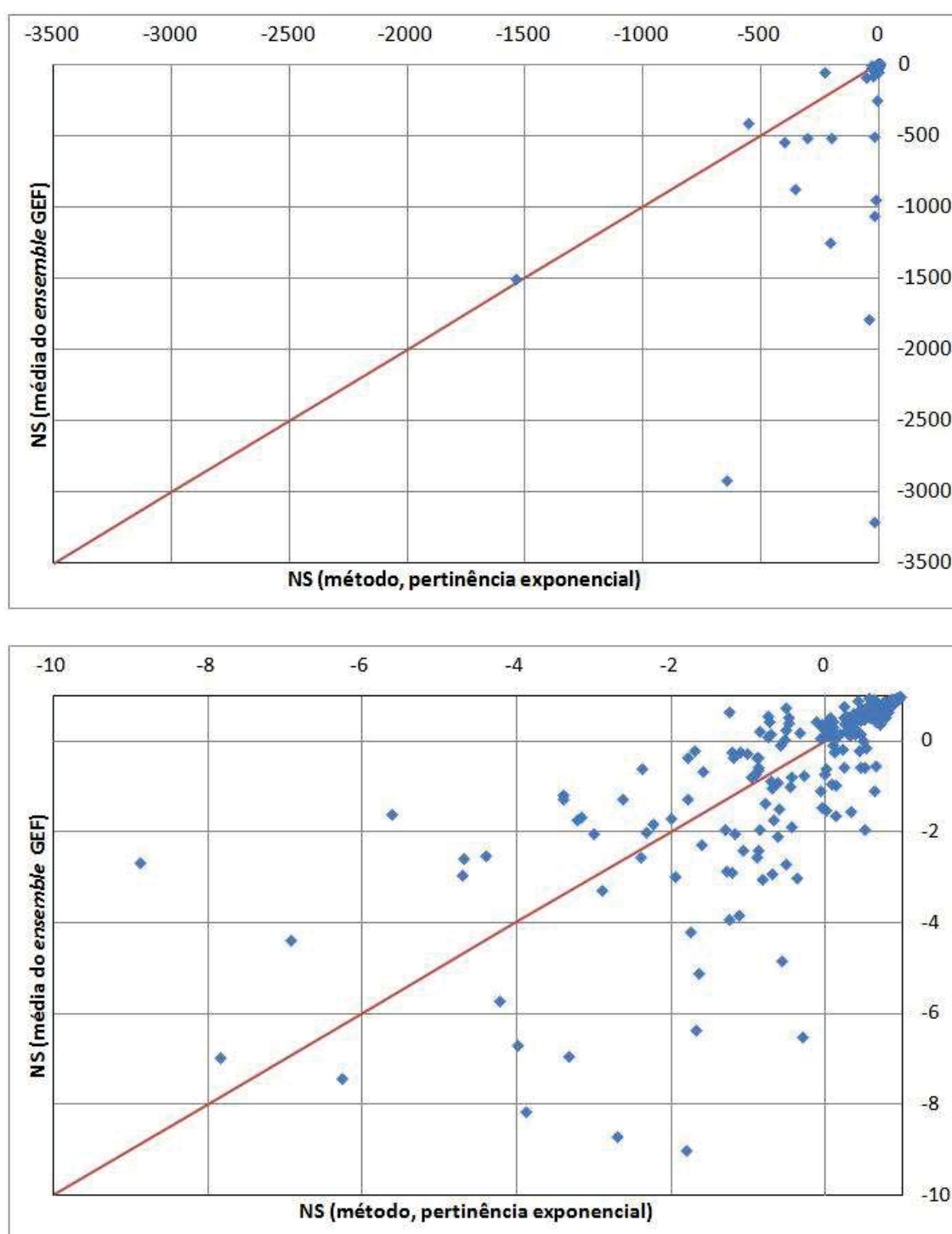


Figura 11A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

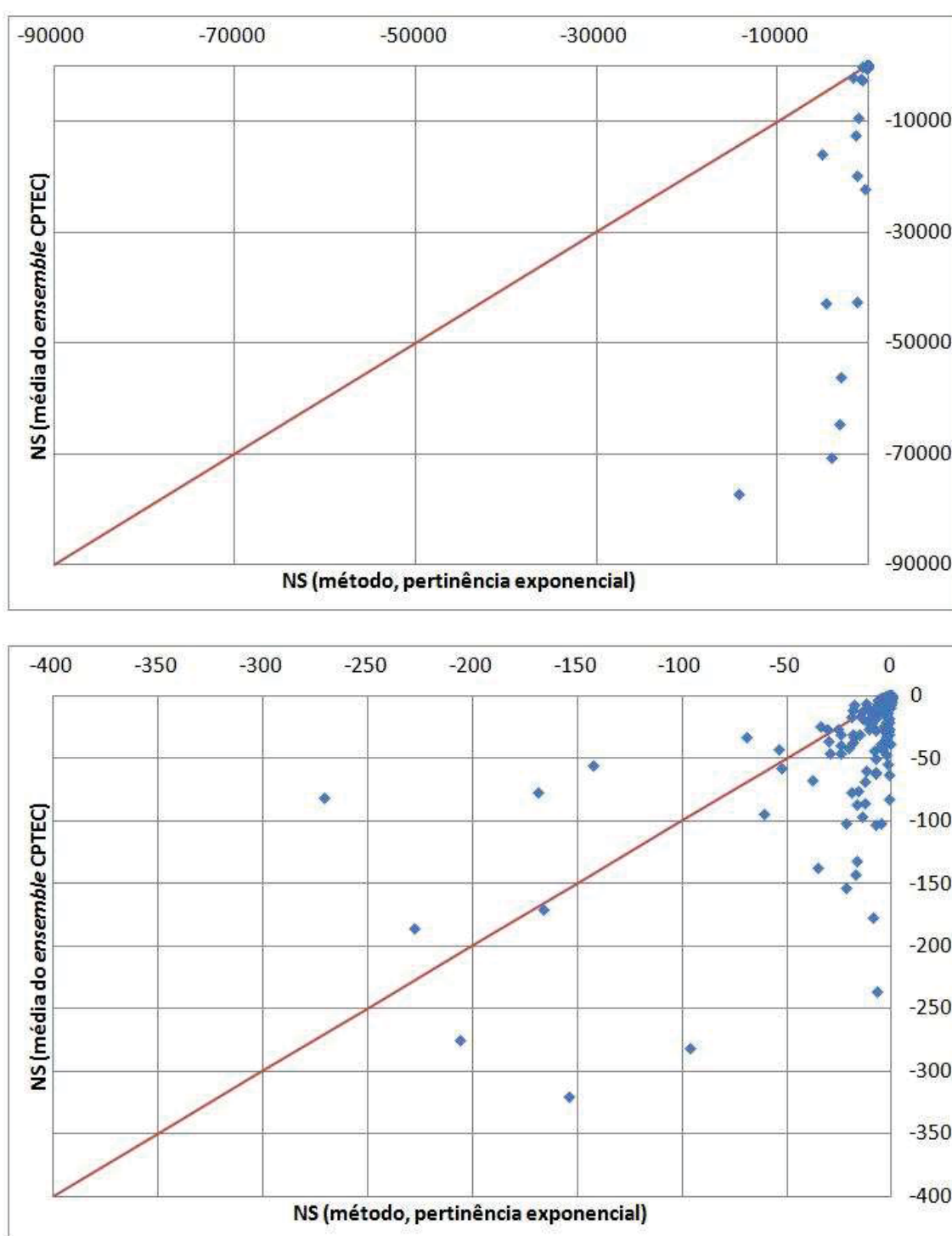


Figura 12A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

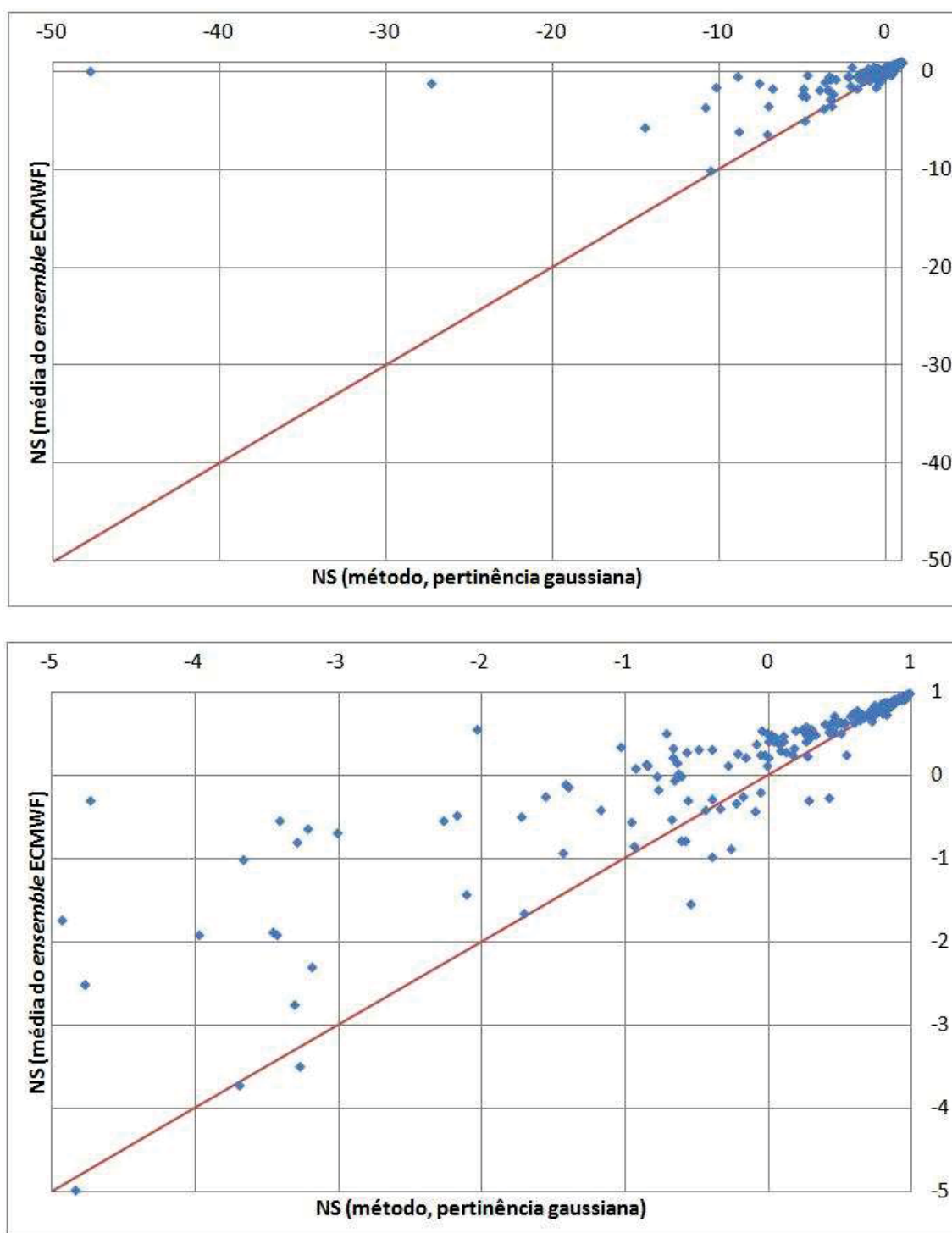


Figura 13A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

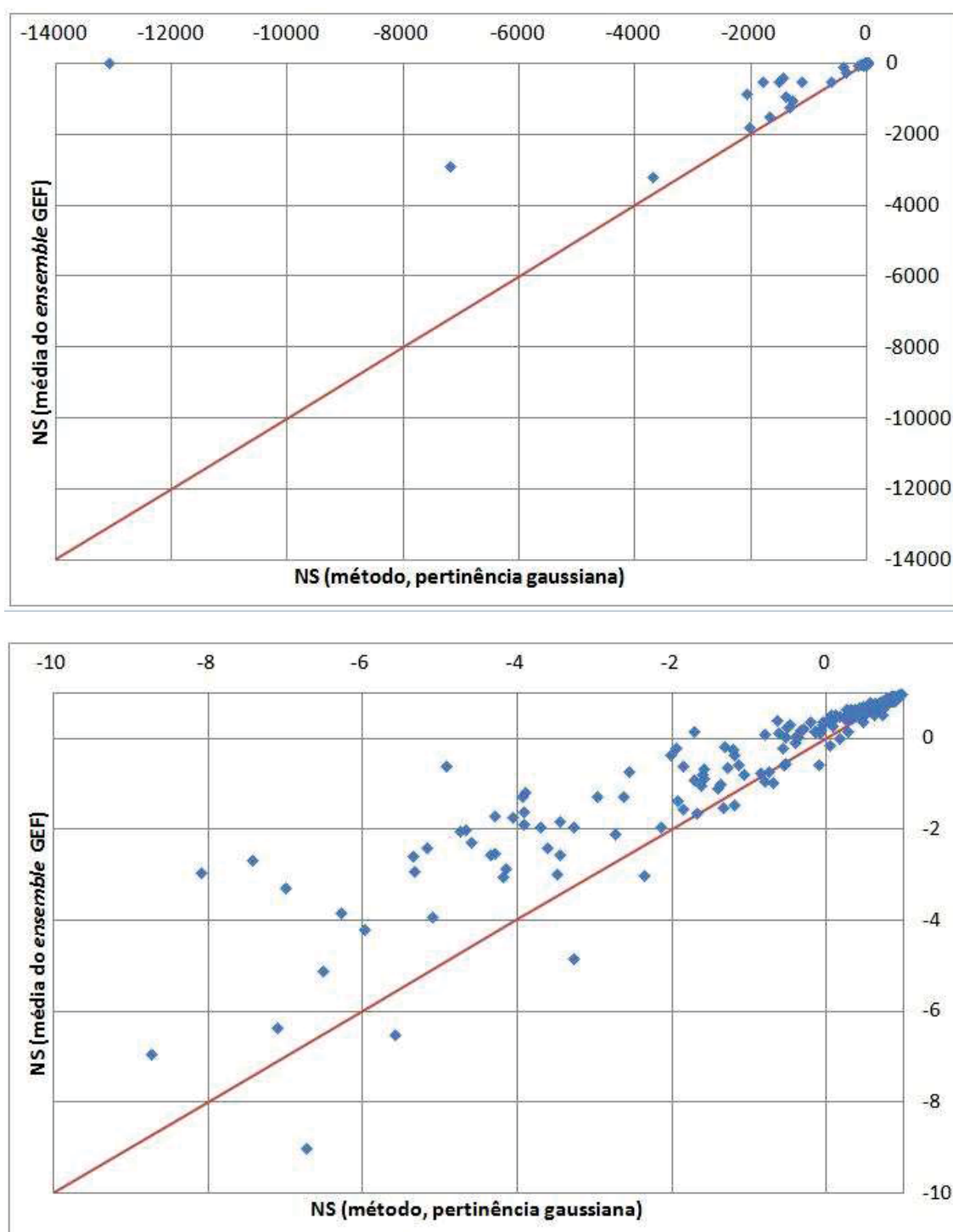


Figura 14A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

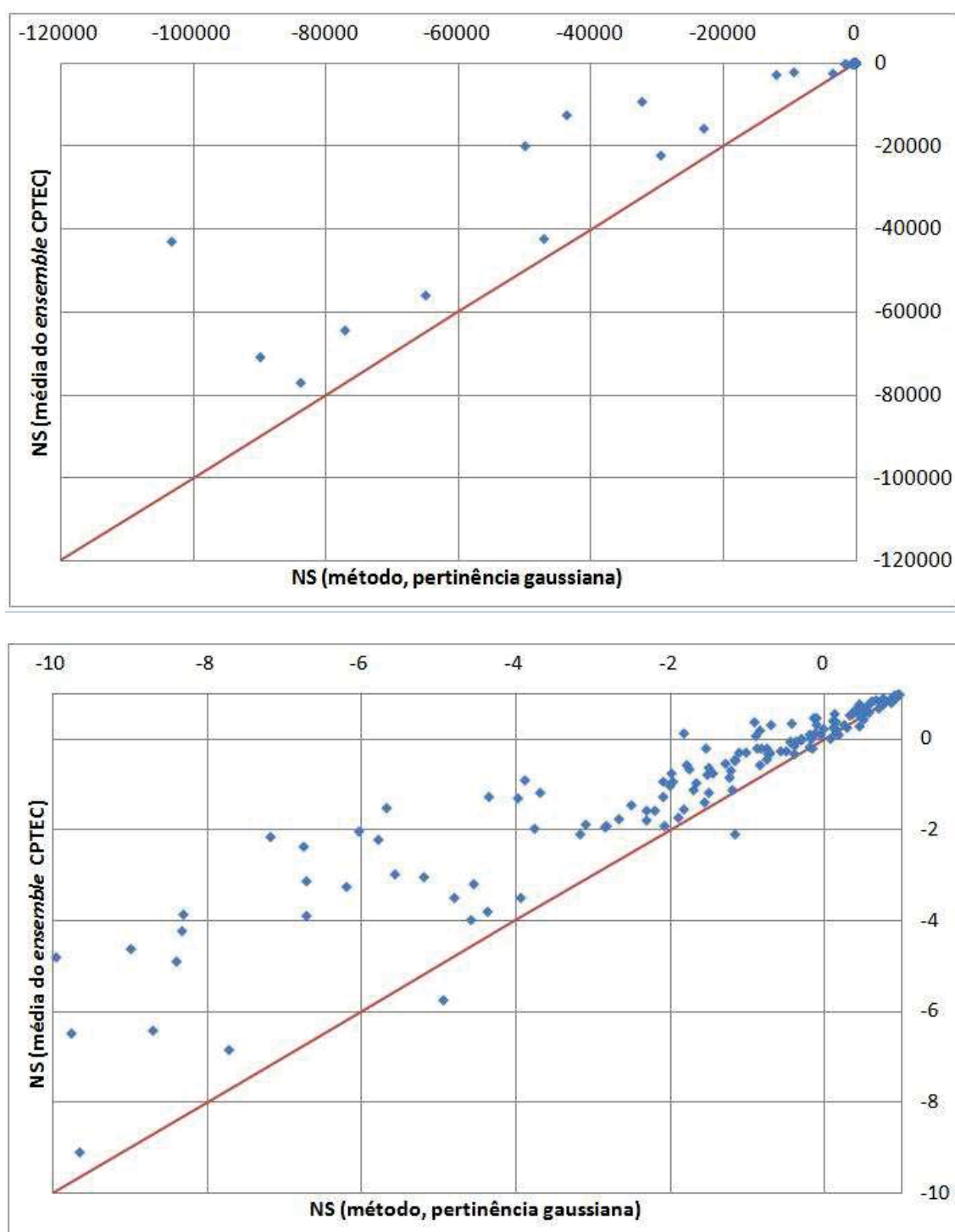


Figura 15A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTC), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

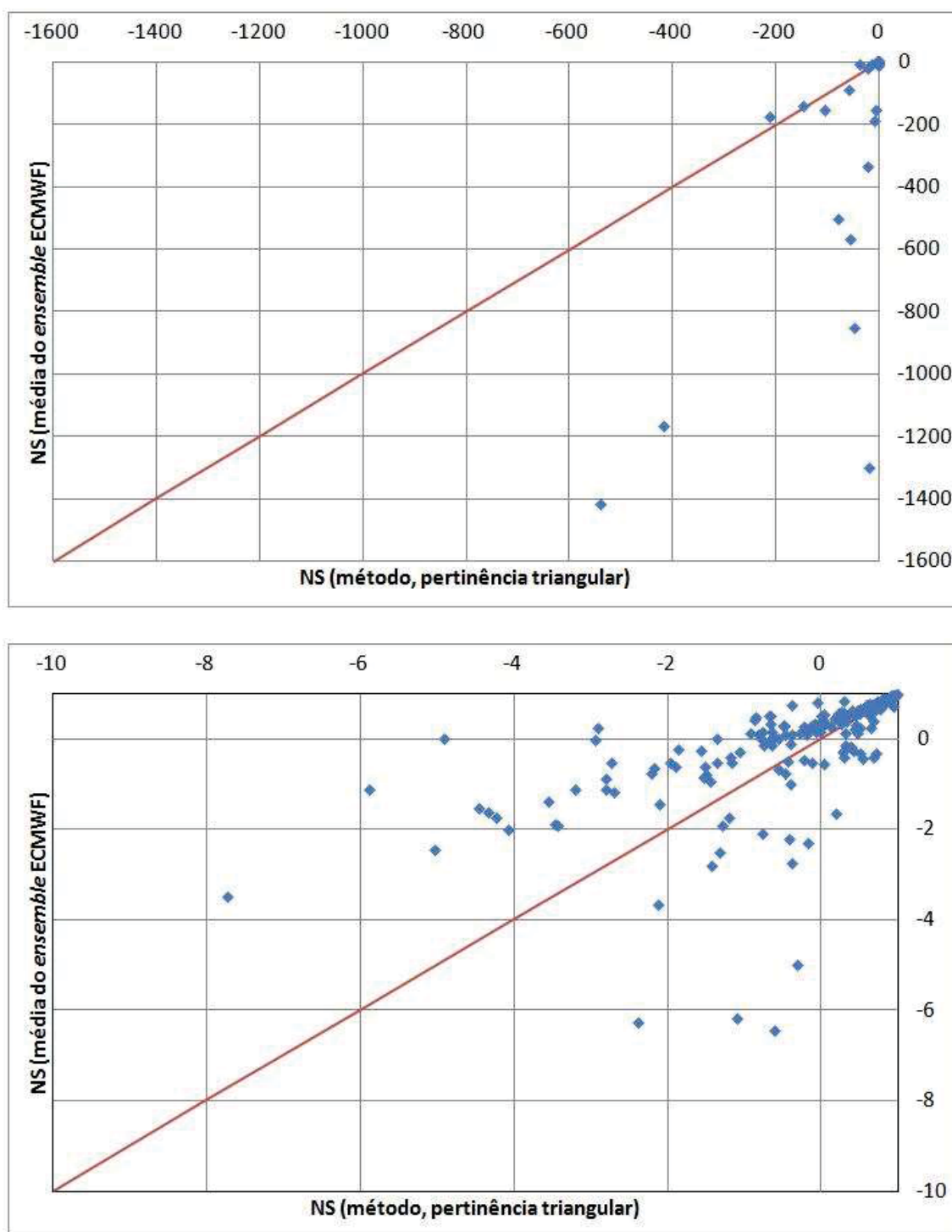


Figura 16A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

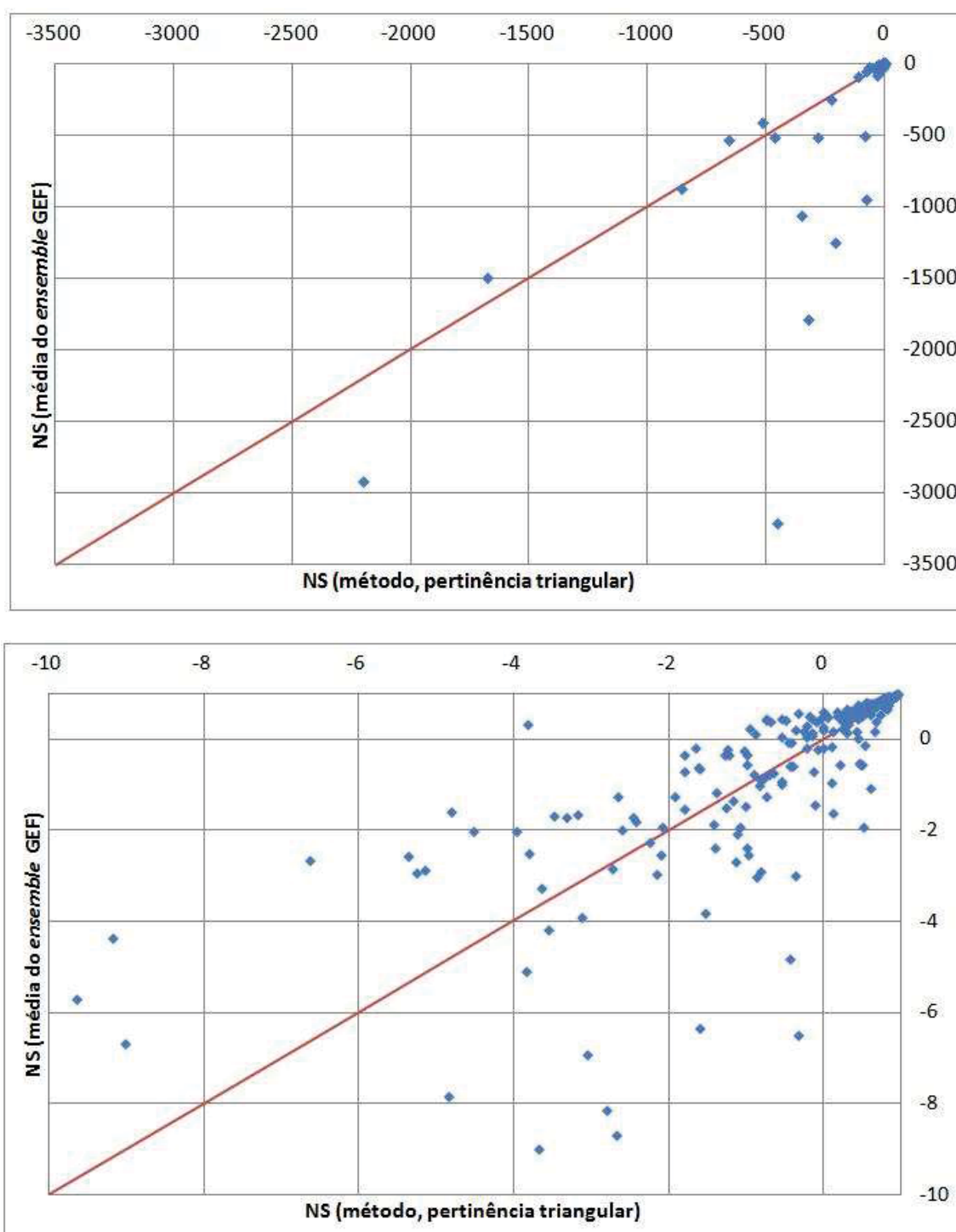


Figura 17A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

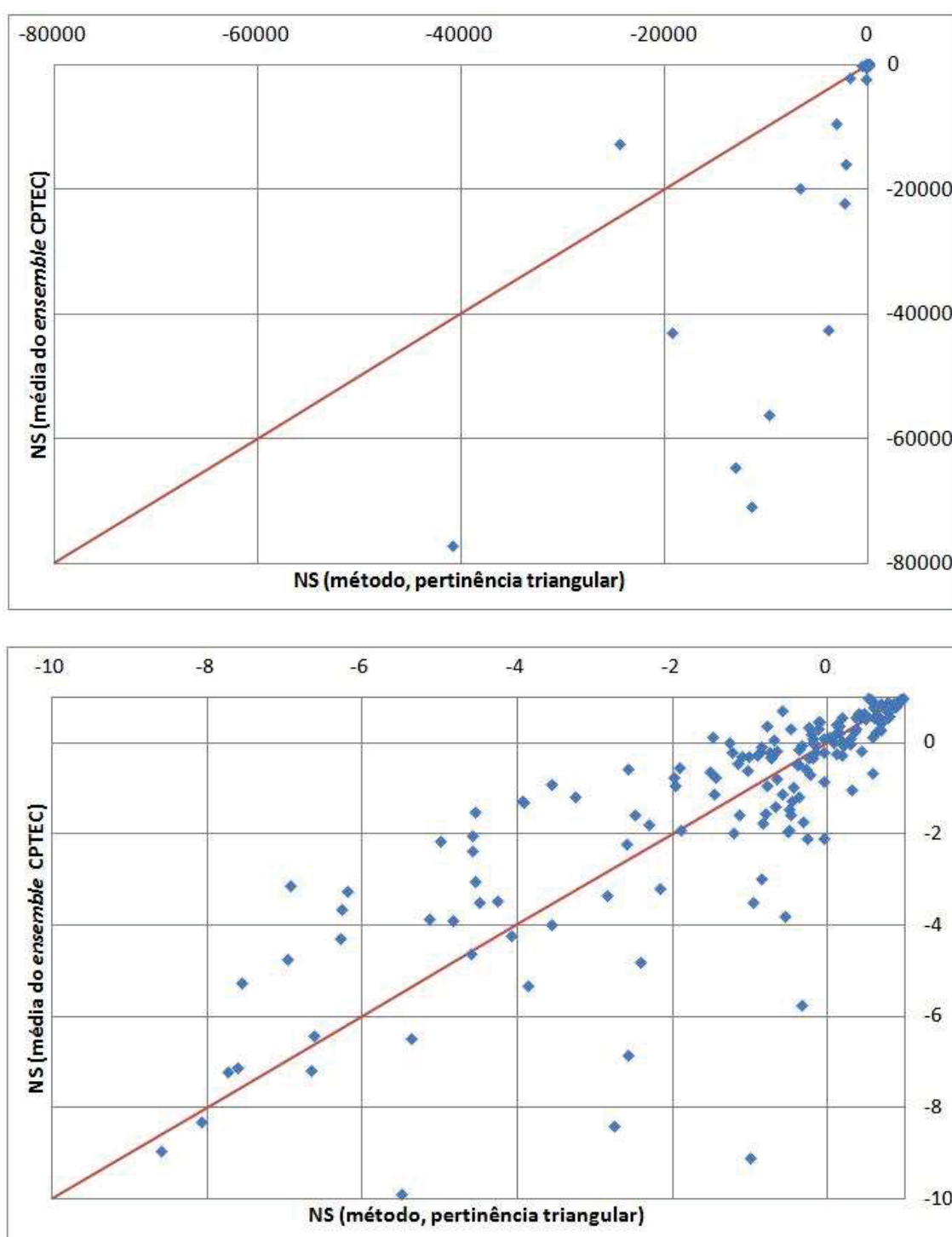


Figura 18A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTec), chuva diária e bacia do Jequitinhonha. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

FIGURAS DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS. FUZIFICAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DE 6 HORAS (ITABAPOANA)

Entre a Figura 19A e Figura 21A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas de 6 horas, com função de pertinência exponencial para o rio Itabapoana. Nestas três figuras percebe-se claramente a superioridade do método proposto em relação à média do *ensemble* do ECMWF, GEFS e CPTEC respectivamente. Isto porque há uma maior concentração de pontos na parte inferior à linha de 45° nos três gráficos.

Entre a Figura 22A e Figura 24A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas de 6 horas, com função de pertinência gaussiana para o rio Itabapoana. Nestas três figuras percebe-se claramente a inferioridade do método proposto em relação à média do *ensemble* do ECMWF, GEFS e CPTEC respectivamente. Isto porque há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45° nos três gráficos.

Entre a Figura 25A e Figura 27A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas de 6 horas, com função de pertinência triangular para o rio Itabapoana. Nestas três figuras percebe-se uma leve superioridade do método proposto, principalmente em relação à média do *ensemble* do CPTEC (Figura).

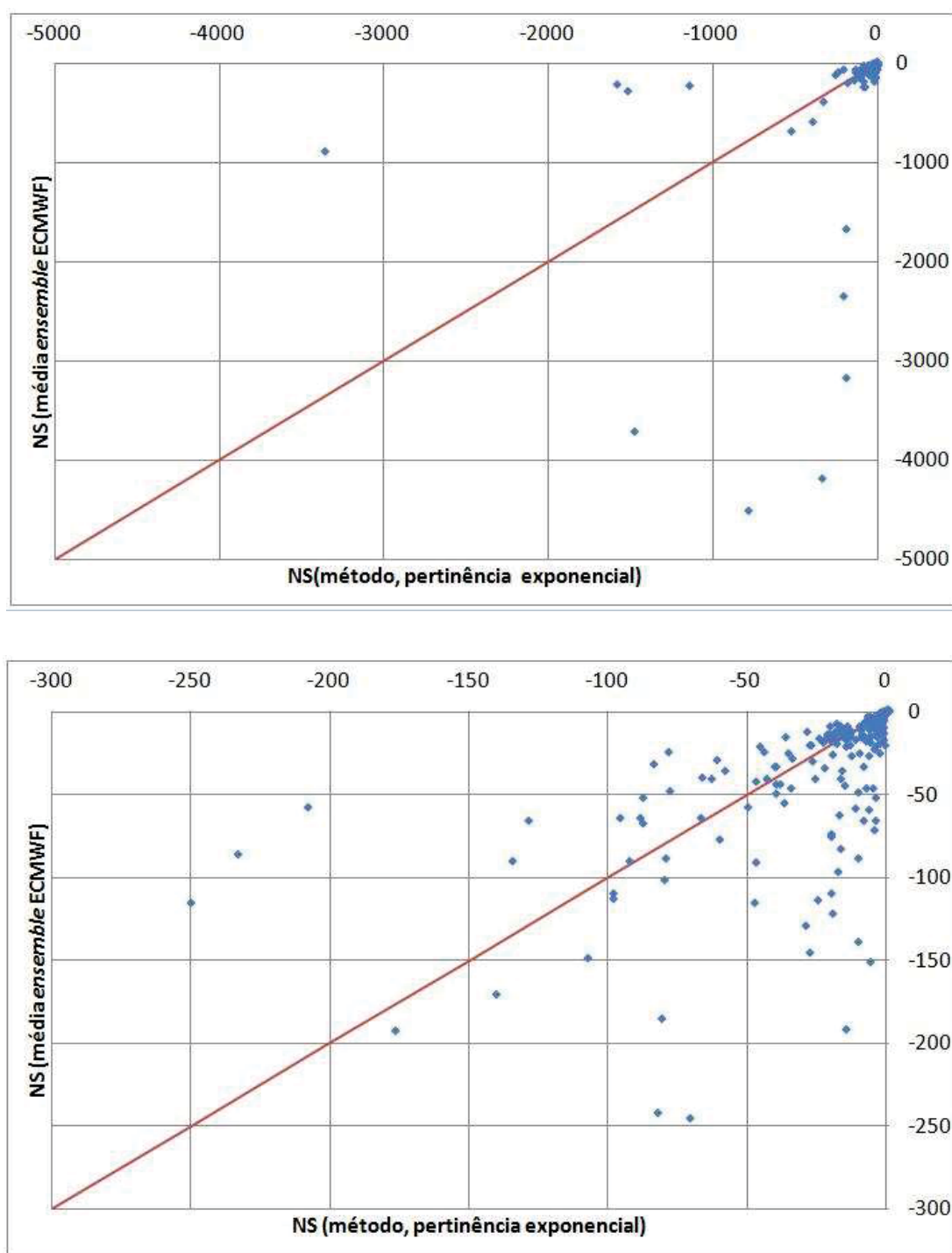


Figura 19A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

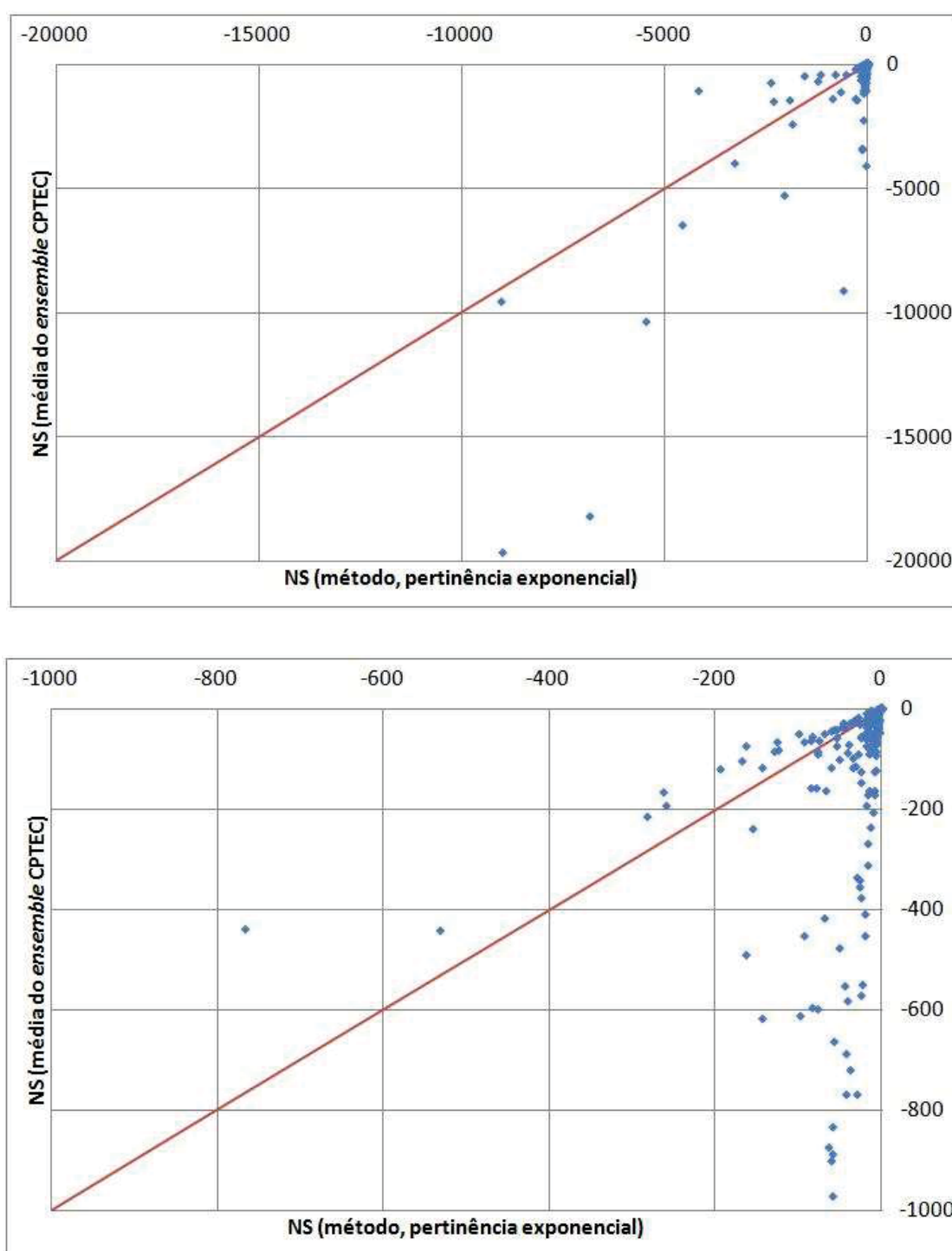


Figura 20A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada e 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores NS.

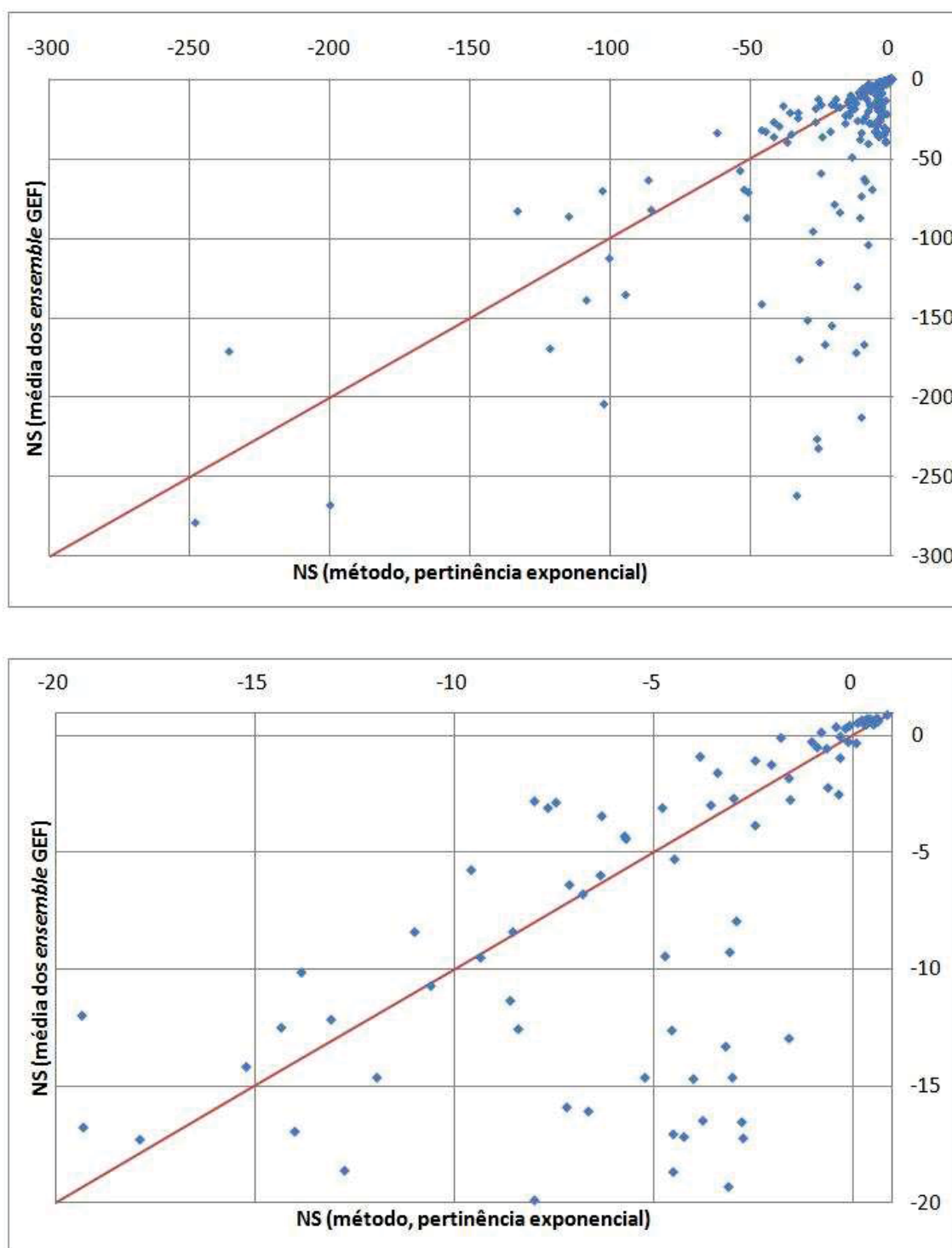


Figura 21A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

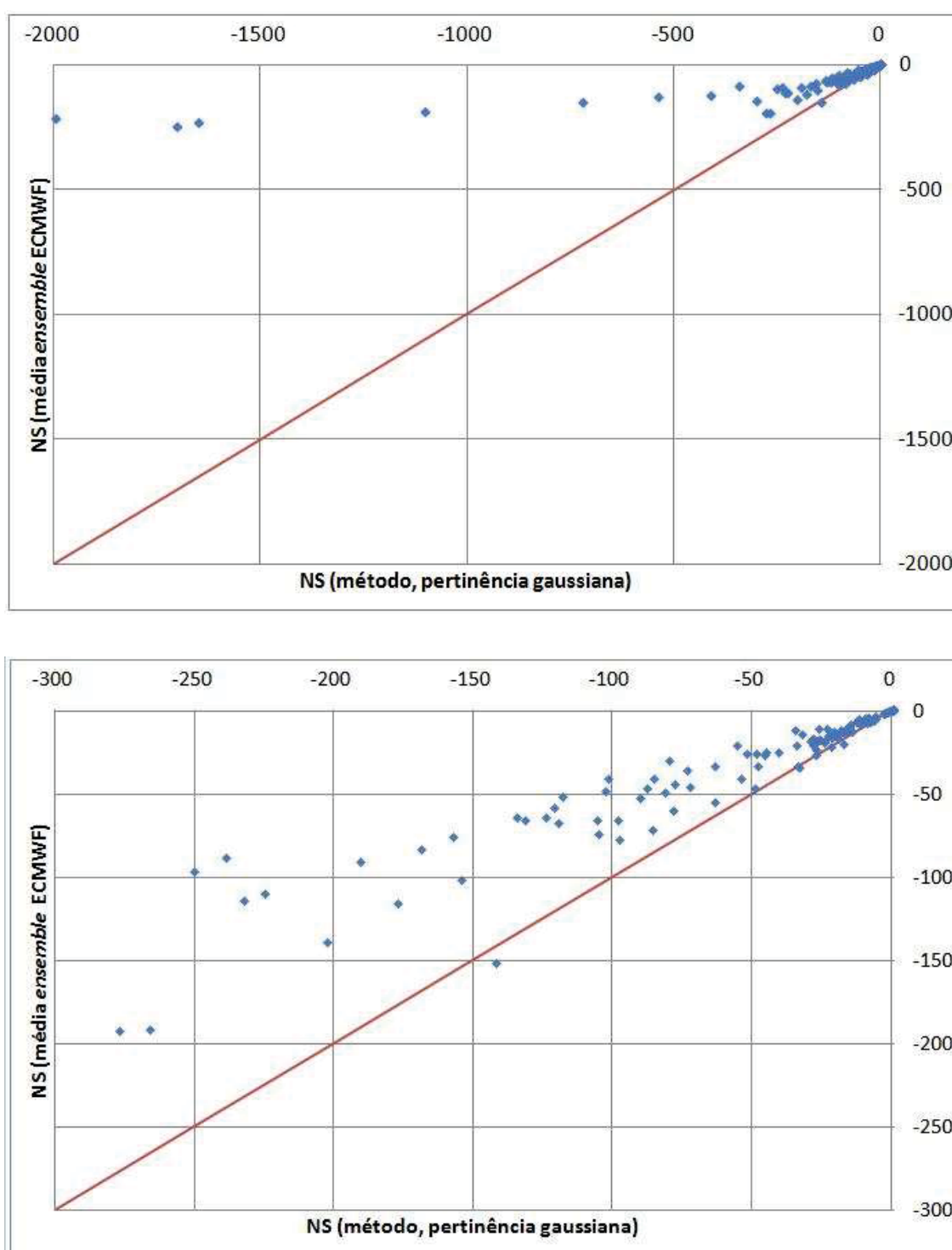


Figura 22A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

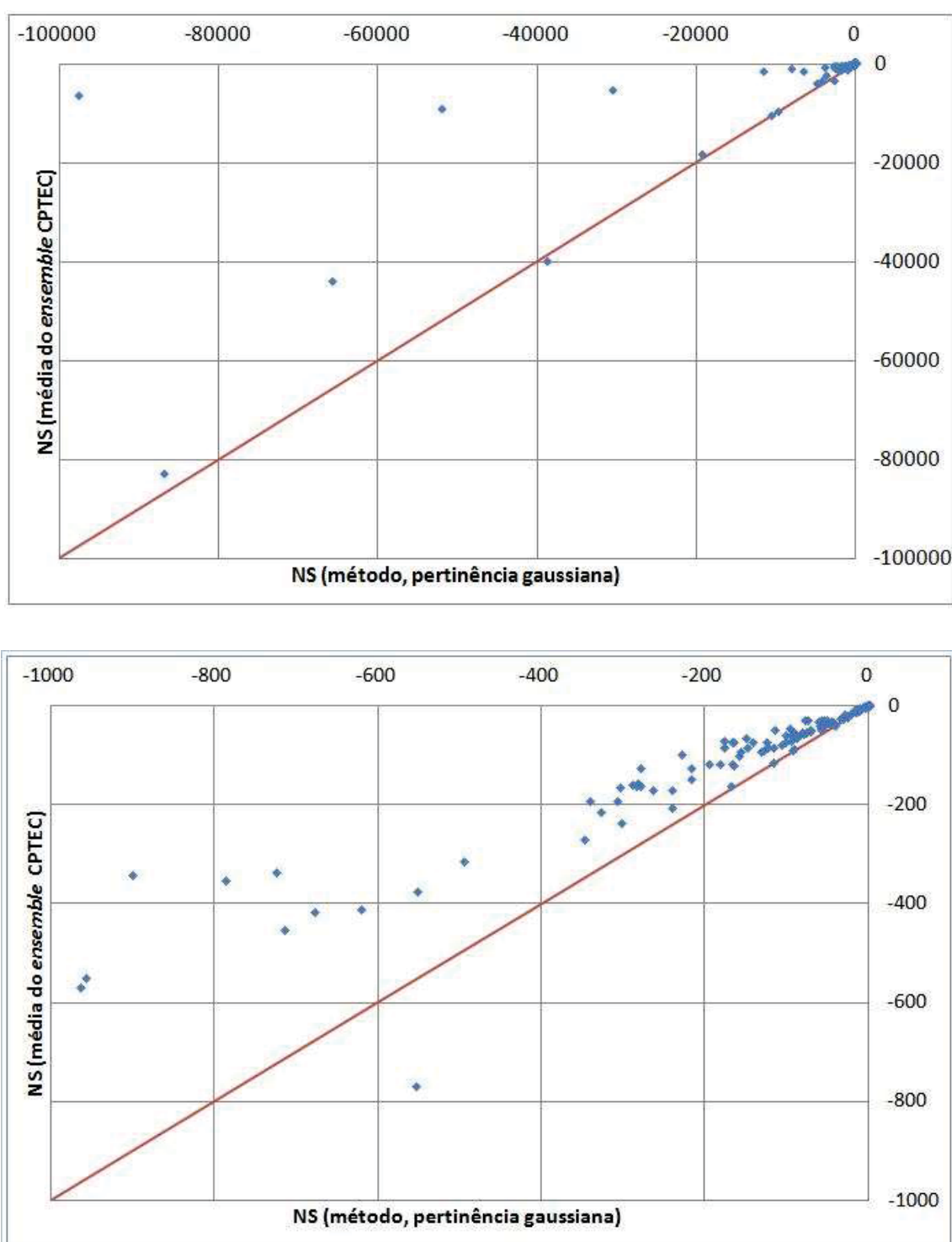


Figura 23A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

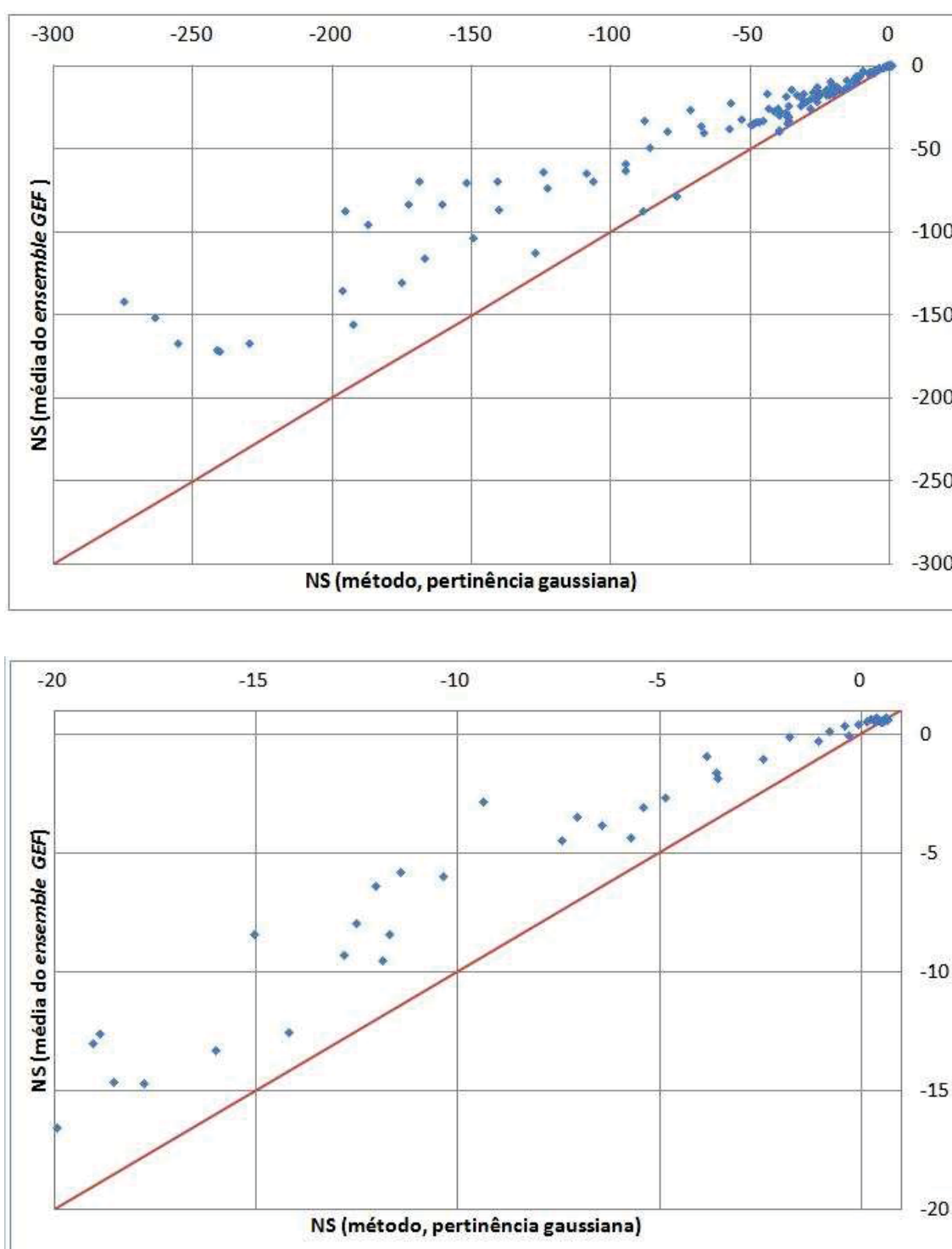


Figura 24A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS). Bacia do Itapapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

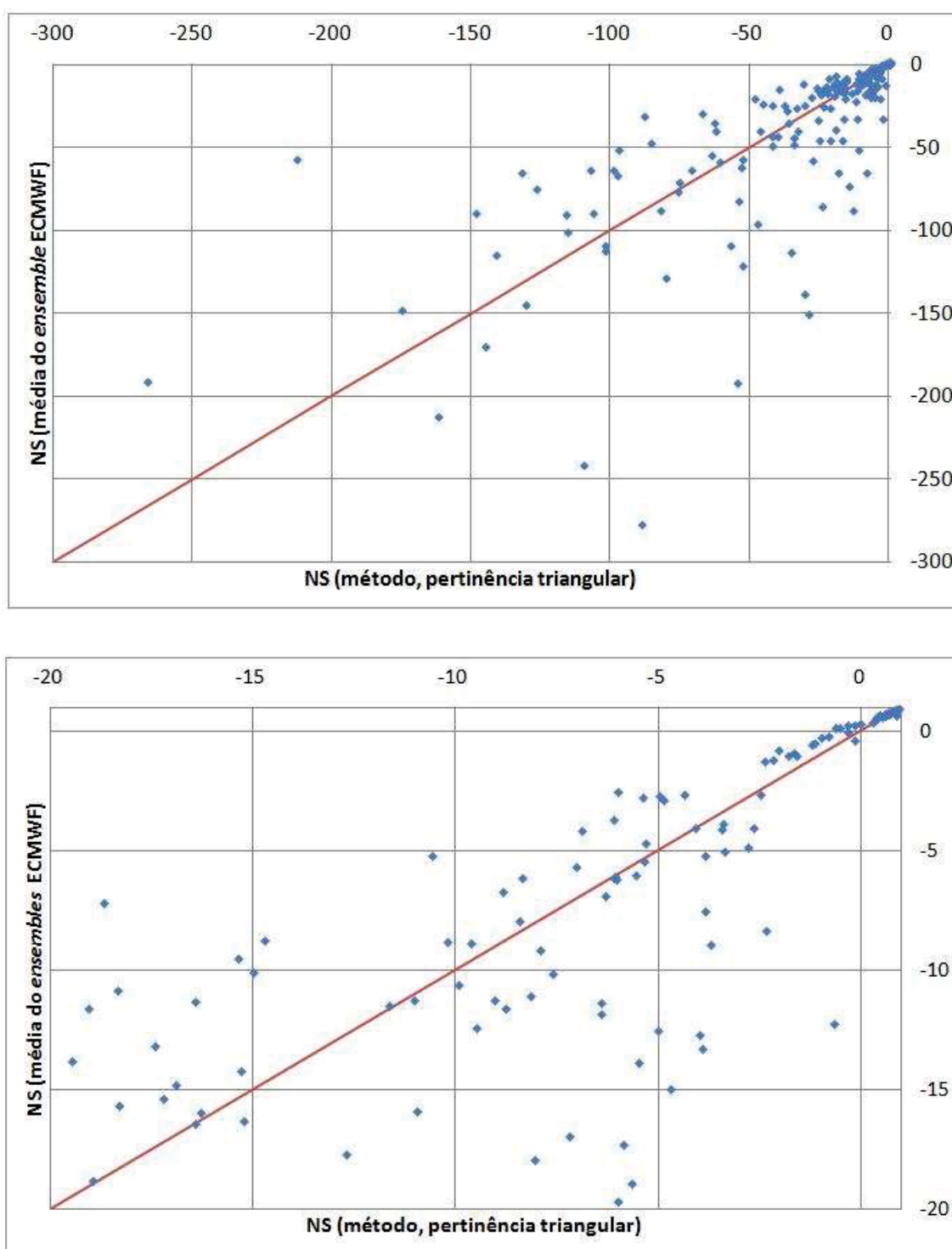


Figura 25A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência Triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

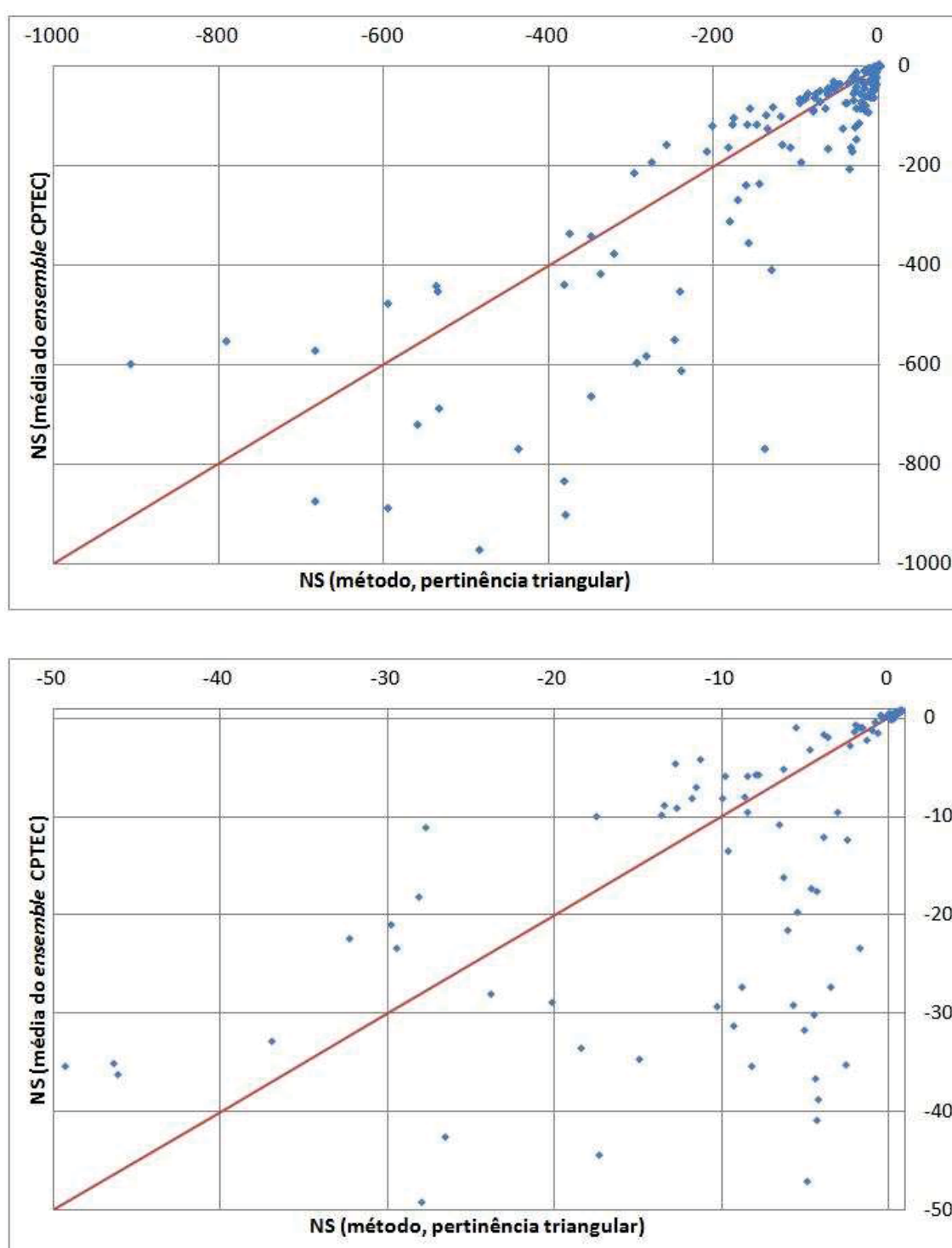


Figura 26A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência Triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

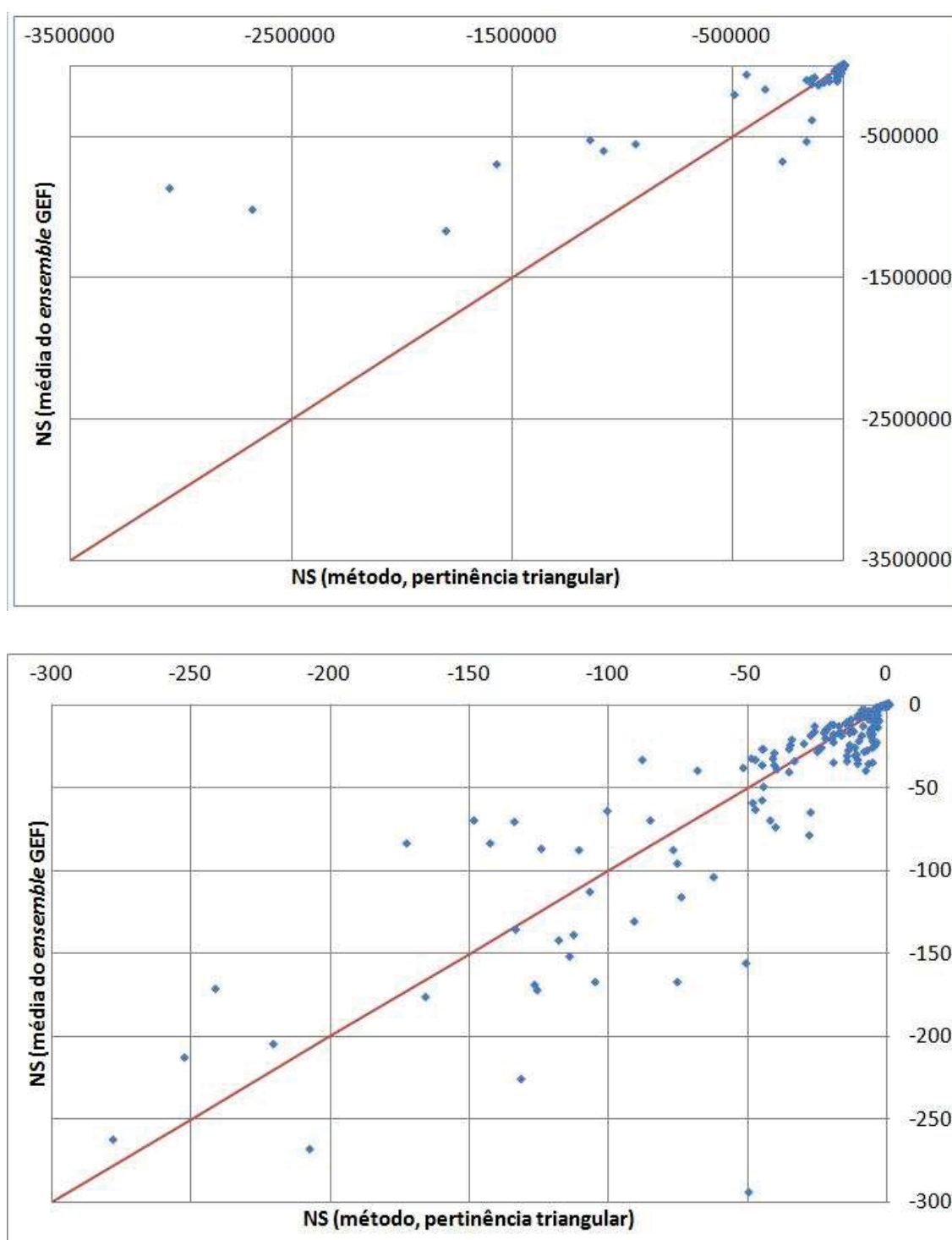


Figura 27A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência Triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS). Bacia do Itabapoana. Chuva acumulada de 6 horas. O gráfico inferior apresenta em detalhe a região com os melhores coeficientes NS.

FIGURAS DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS. FUZIFICAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DE 6 HORAS (JEQUITINHANHA)

Entre a Figura 28A e Figura 30A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas de 6 horas, com função de pertinência exponencial para o rio Jequitinhonha. Nestas três figuras percebe-se a superioridade do método proposto em relação à média do *ensemble* do ECMWF, GEFS e CPTEC respectivamente. Isto porque há uma maior concentração de pontos na parte inferior à linha de 45° nos três gráficos.

Entre a Figura 31A e Figura 33A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas de 6 horas, com função de pertinência gaussiana para o rio Jequitinhonha. Nestas três figuras percebe-se claramente a inferioridade do método proposto em relação à média do *ensemble*. Isto porque há uma maior concentração de pontos na parte superior à linha de 45° nos três gráficos.

Entre a Figura 34A e Figura 36A são apresentados os resultados da calibração da fuzificação das chuvas de 6 horas, com função de pertinência triangular para o rio Jequitinhonha. Nestas três figuras percebe-se uma equivalência dos métodos. Isto porque não há uma maior concentração de pontos na parte superior ou inferior à linha de 45° nos três gráficos.

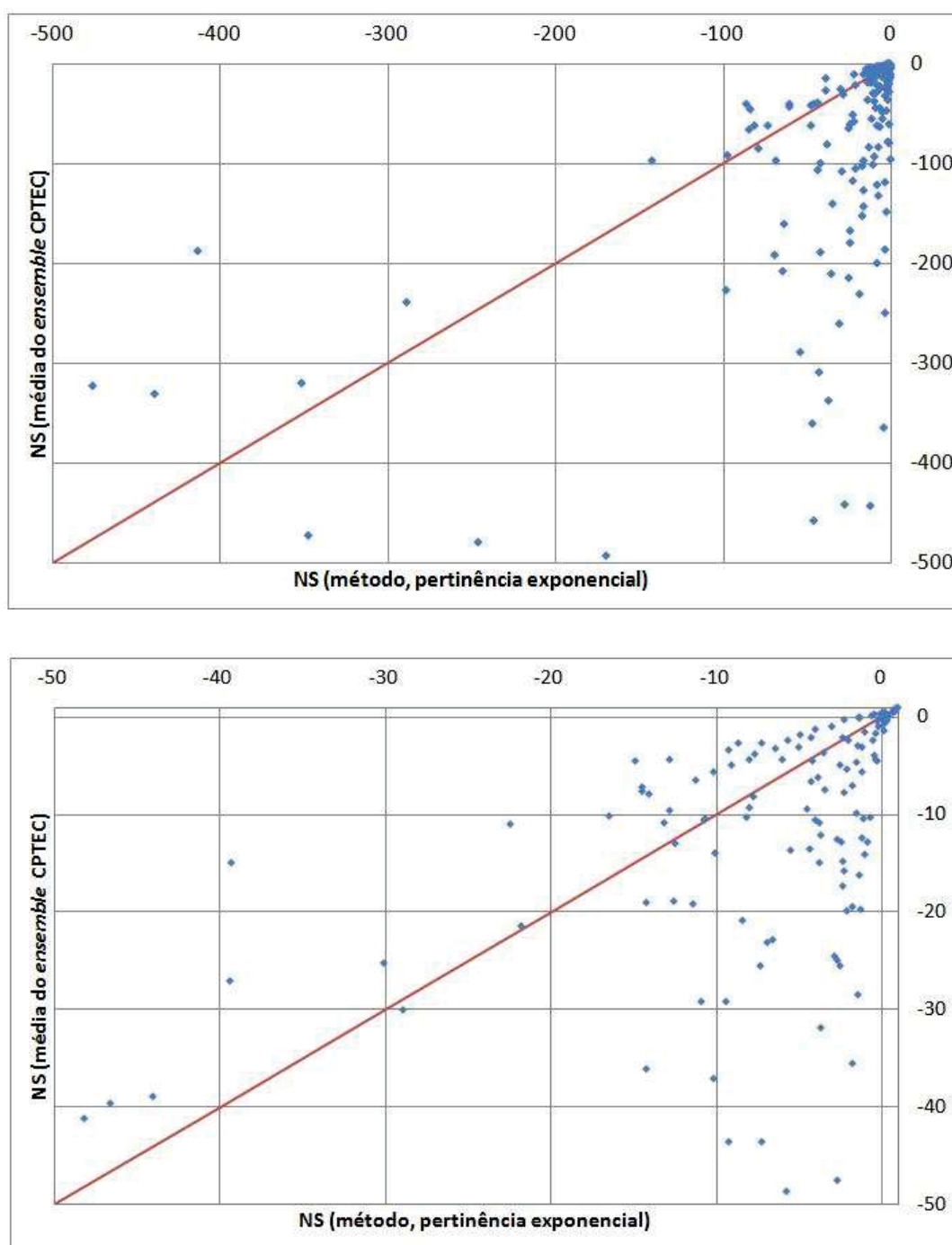


Figura 28A – Comparação entre os índices de NS (NS) do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

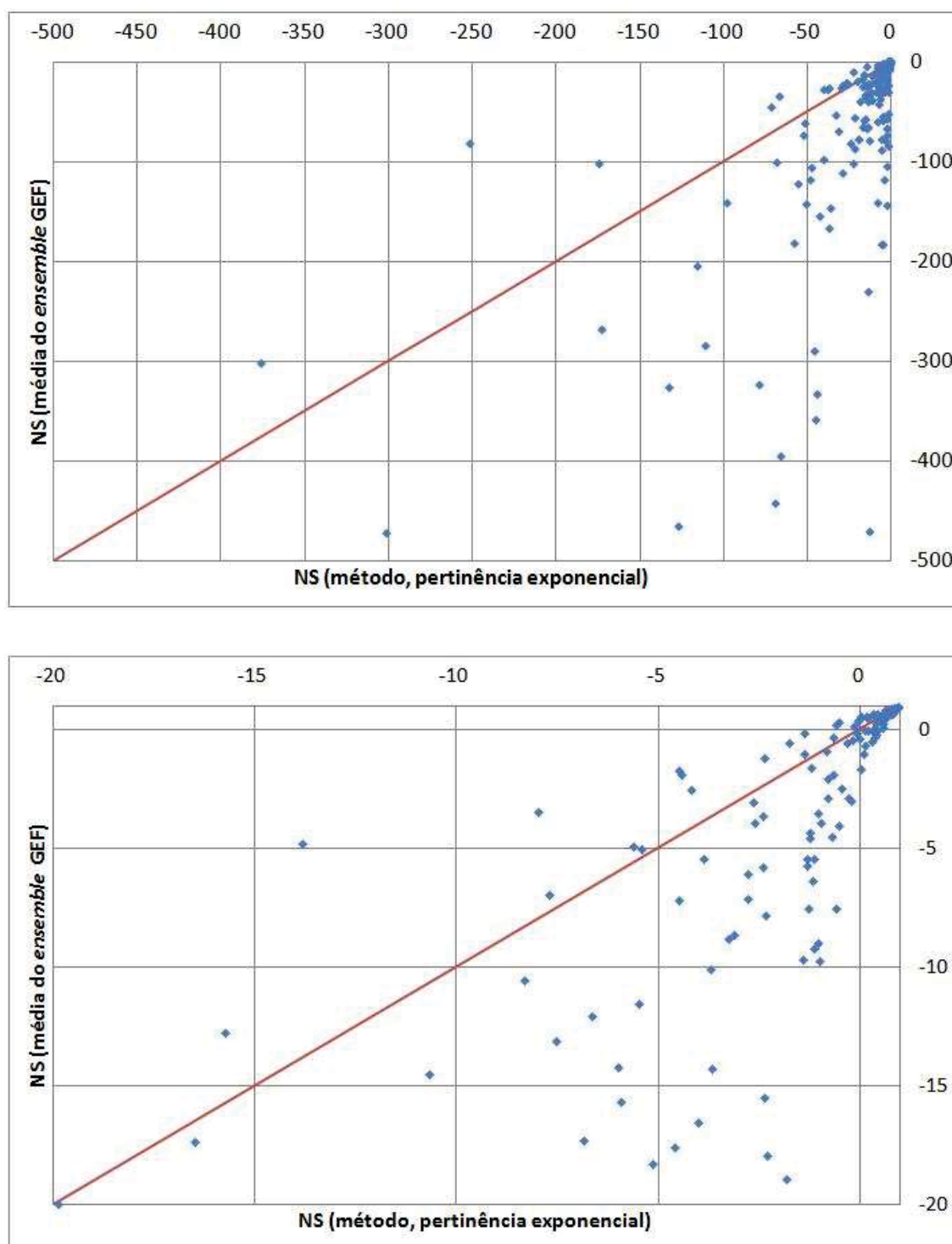


Figura 29A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

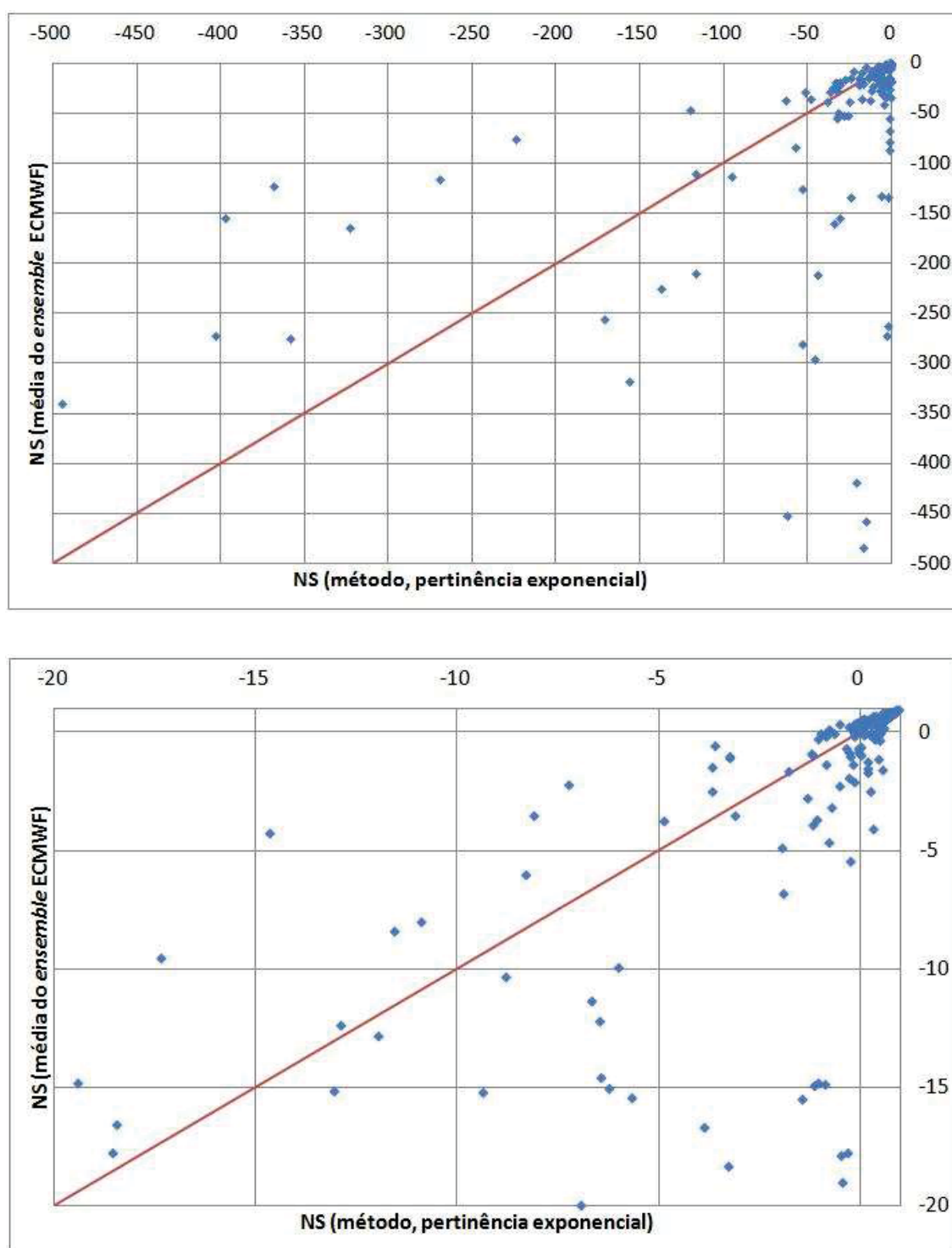


Figura 30A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência exponencial) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

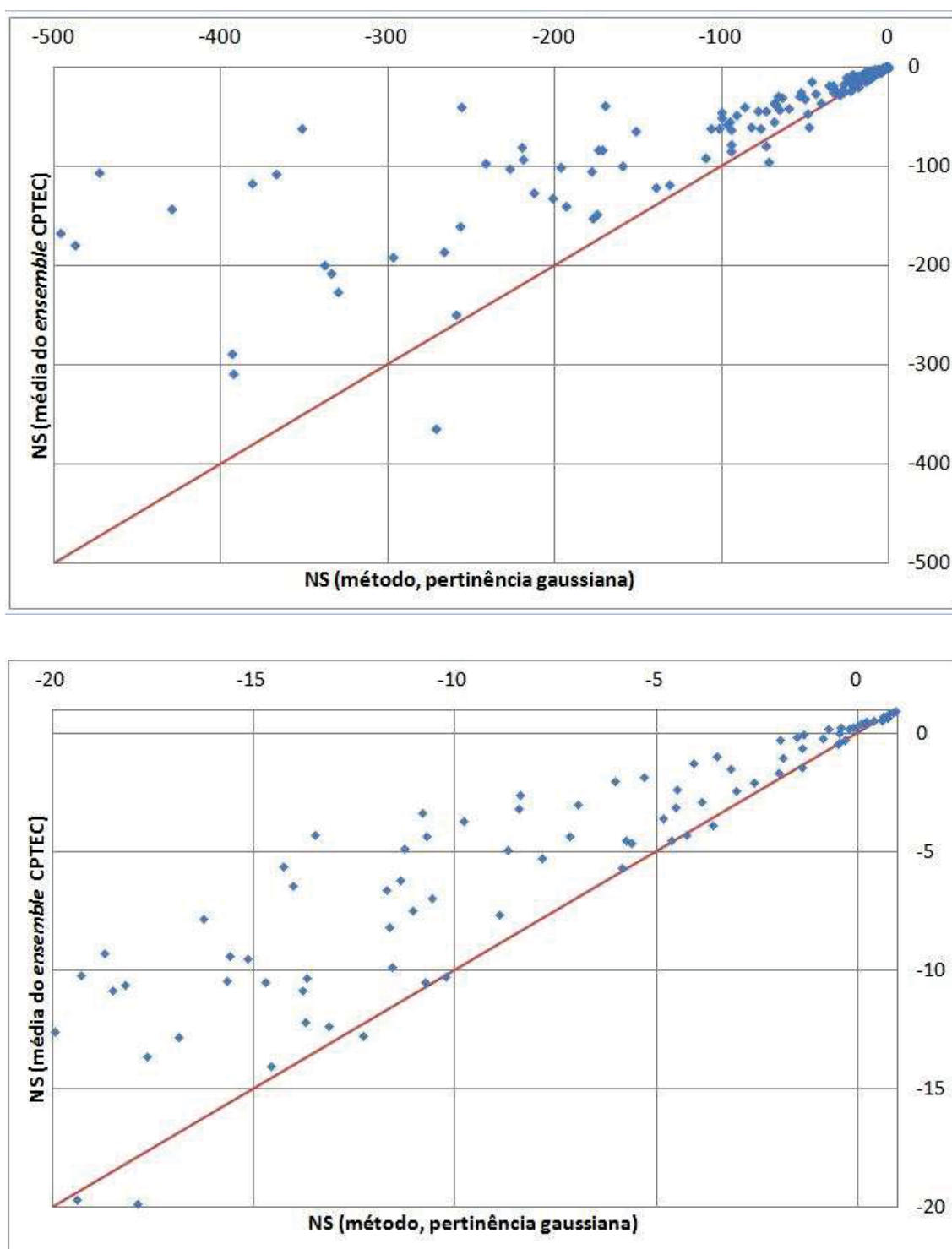


Figura 31A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTC). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

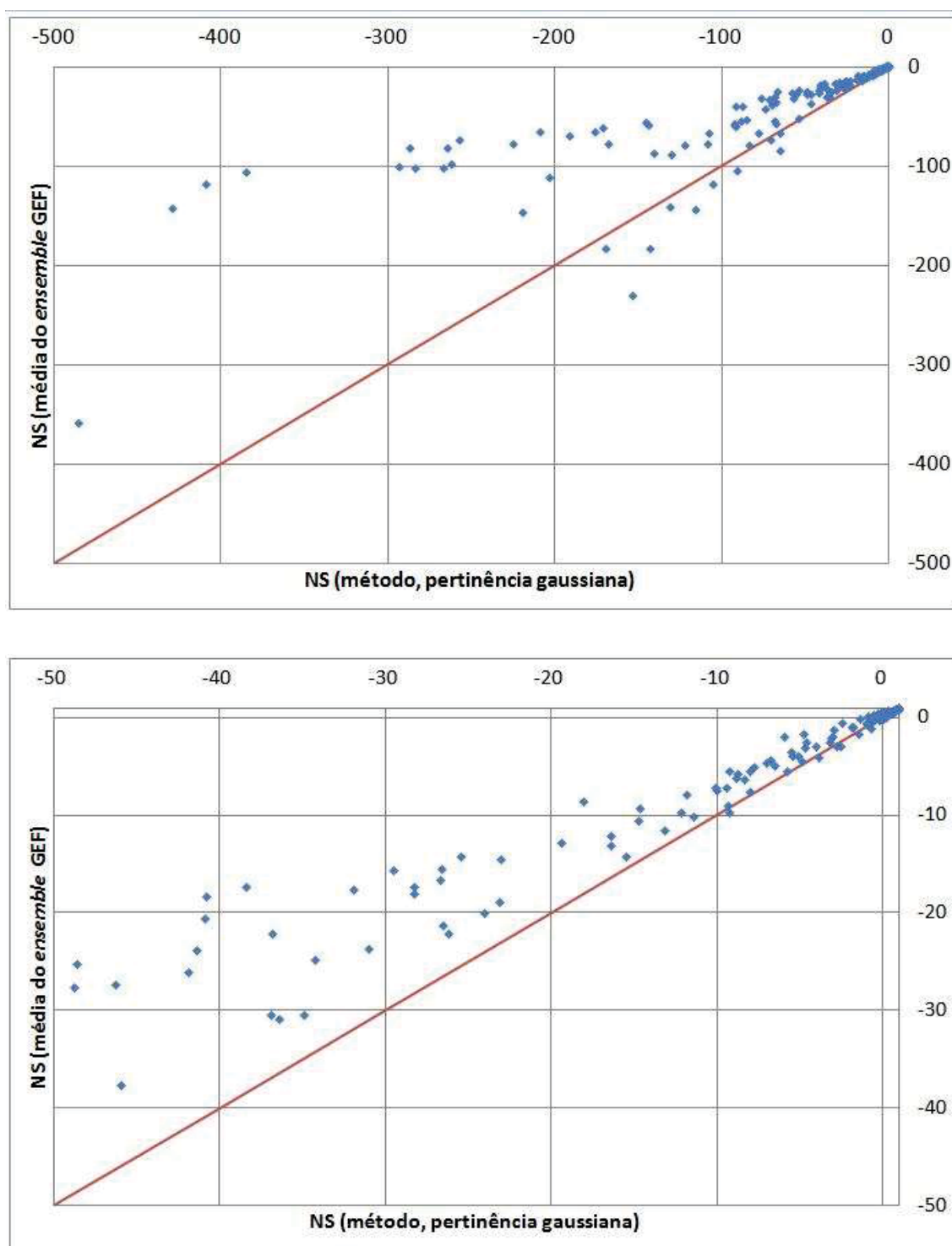


Figura 32A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

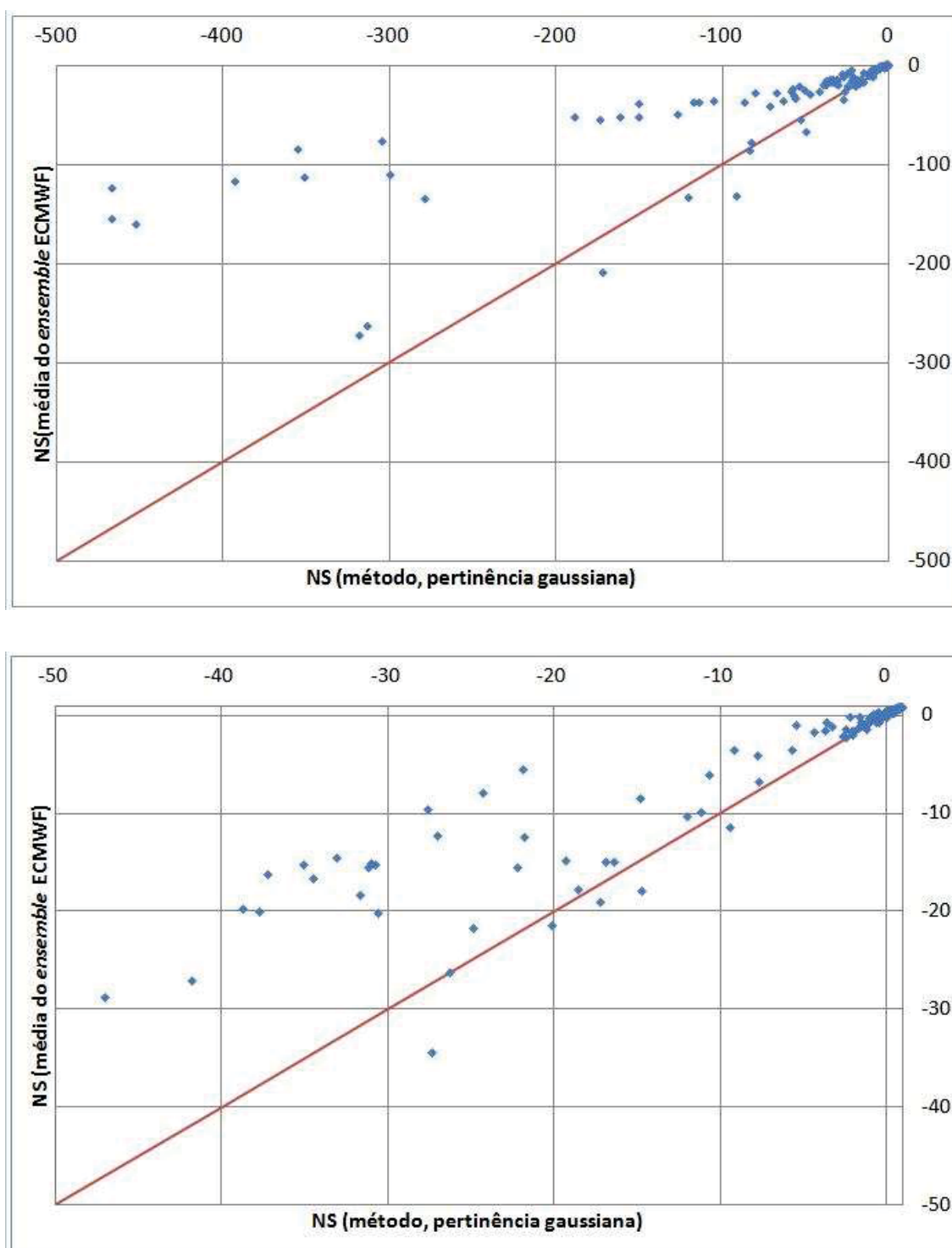


Figura 33A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência gaussiana) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

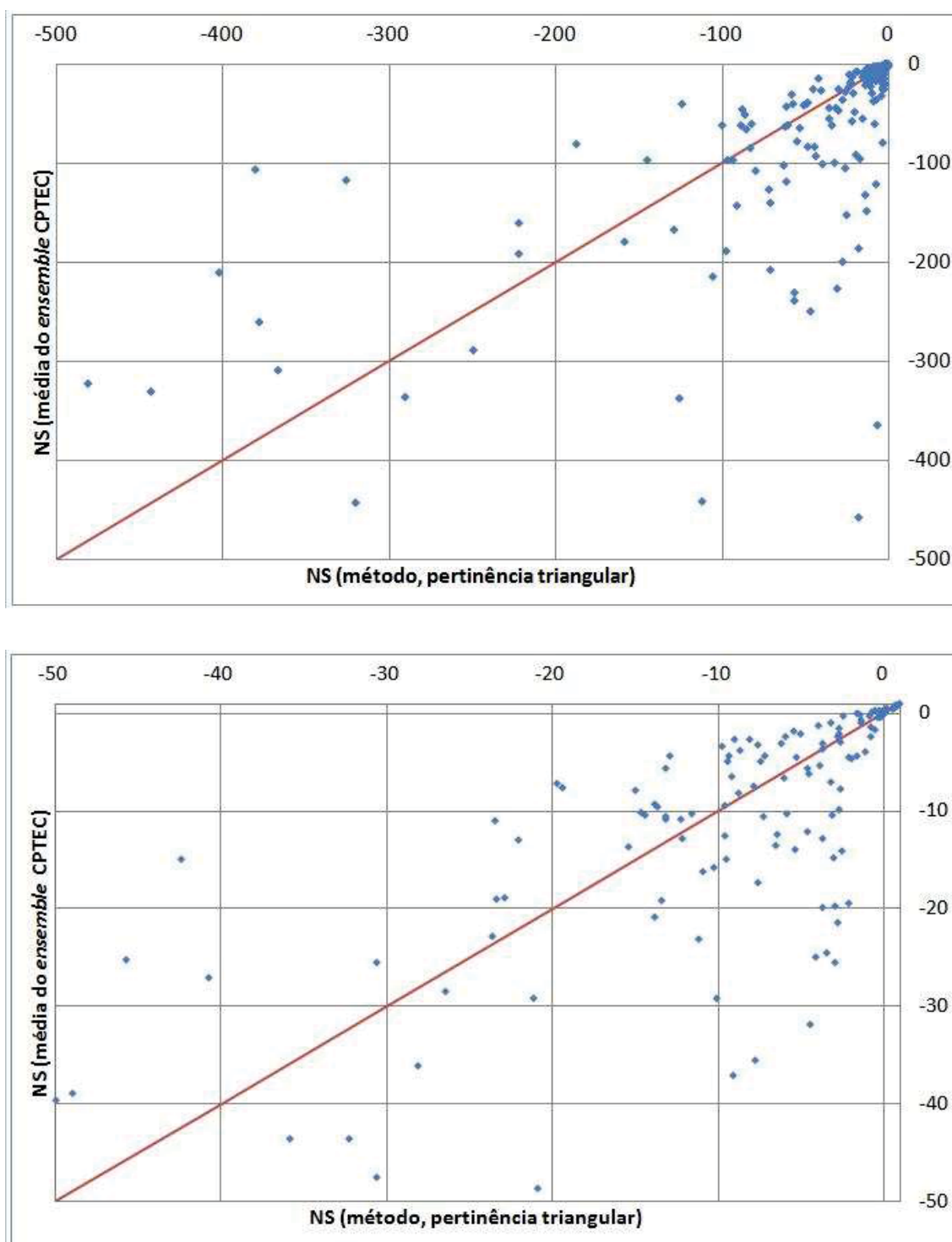


Figura 34A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (CPTEC). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

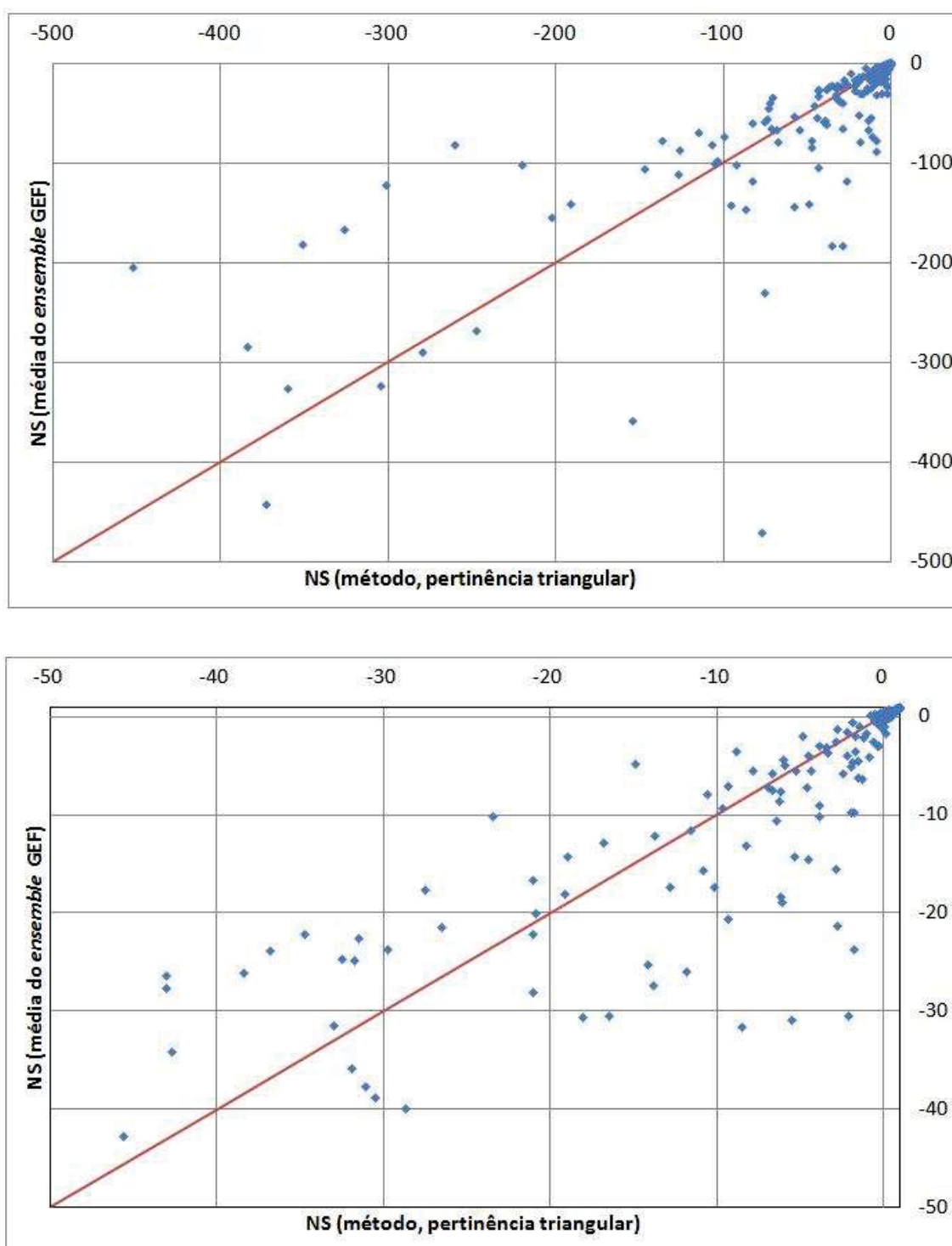


Figura 35A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (GEFS). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

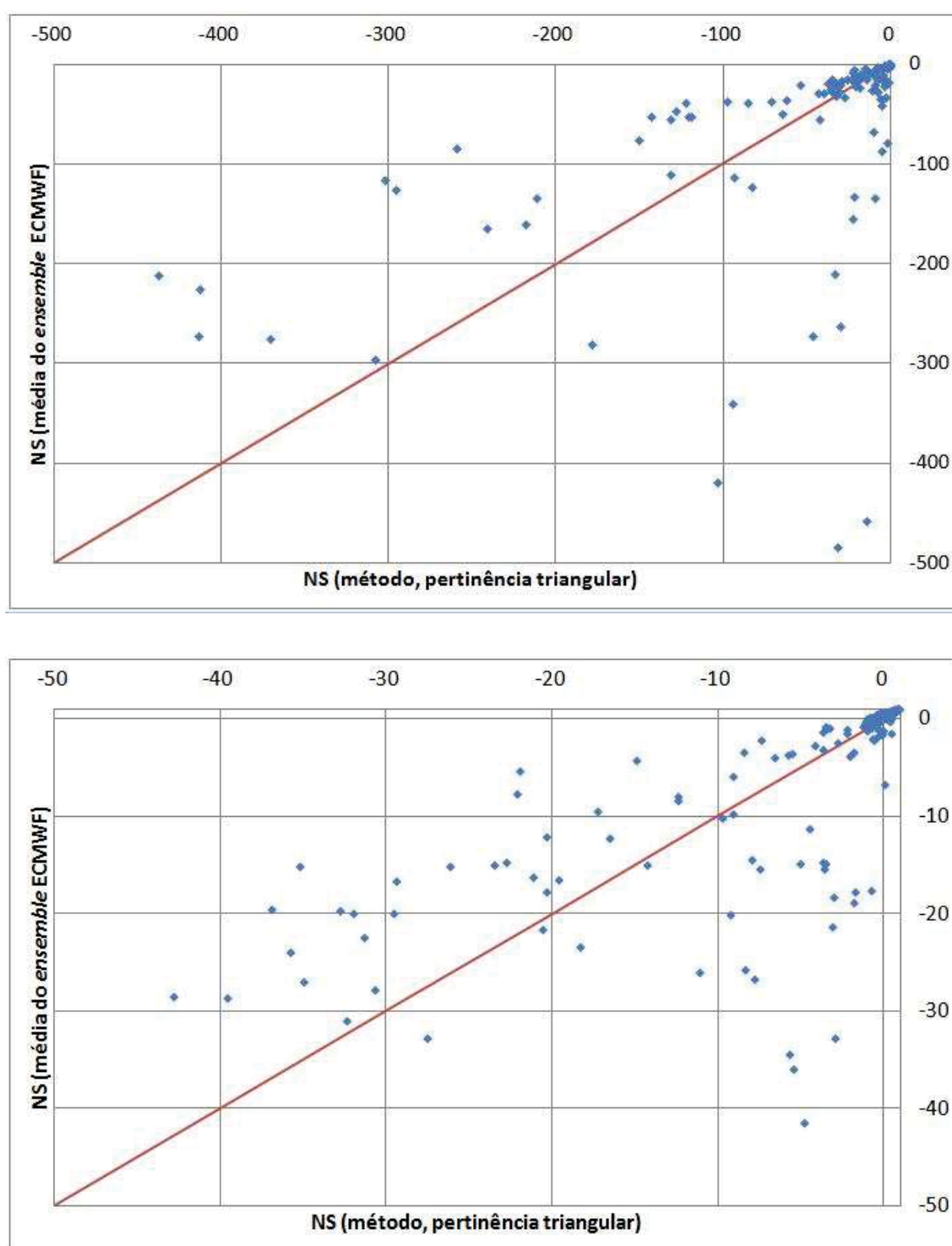


Figura 36A – Comparação entre os índices de NS do método proposto (pertinência triangular) e da média dos *ensembles* pluviométricos (ECMWF). Bacia do Jequitinhonha. Chuva acumulada de 6 horas.

VALORES DOS PARAMETROS (RESULTADOS DO ACP)

Neste item do Apêndice são apresentados os parâmetros das funções de pertinência exponencial do método proposto após a calibração e agrupamento pelo ACP, mostrando os vários grupos para os vários casos estudados

Entre a Tabela 27 e Tabela 29 são apresentados os parâmetros para o rio Jequitinhonha utilizando o ensemble do CPTEC, ECMWF e GEFS respectivamente.

Entre a Tabela 30 e Tabela 32 são apresentados os parâmetros para o rio Jequitinhonha utilizando o ensemble do CPTEC, ECMWF e GEFS respectivamente.

Tabela 27 - Parâmetros médios de cada grupo utilizando o CPTEC e bacia do Jequitinhonha, chuvas diária

Grupo	L	a	b
A	1.425	7.221	1.645
B	0.933	2.769	1.230
C	0.000	9.418	0.191
D	0.422	1.686	0.000
E	0.910	8.615	1.017
F	2.317	5.577	3.654

Tabela 28 - Parâmetros médios de cada grupo utilizando o ECMWF e bacia do Jequitinhonha, chuvas diária

Grupo	L	a	b
A	0.000	11.148	0.034
B	1.030	9.692	0.914
C	1.503	13.215	1.363

Tabela 29 - Parâmetros médios de cada grupo utilizando o GEFS e bacia do Jequitinhonha, chuvas diária

Grupos	L	a	b
A	0.000	10.095	0.000
B	0.116	0.670	0.000
C	0.934	8.665	0.802
D	0.787	6.379	0.682

Tabela 30 - Parâmetros médios de cada grupo utilizando o CPTEC e bacia do Itabapoana, chuvas diária

Grupo	L	a	b
A	1.158	7.203	1.245
B	0.579	15.368	0.817
C	0.948	6.009	0.997
D	0.884	13.066	0.838
E	0.700	6.737	0.625
F	0.000	483.593	0.092
G	1.016	7.407	1.357

Tabela 31 - Parâmetros médios de cada grupo utilizando o ECMWF e bacia do Itabapoana, chuvas diária

Grupo	L	a	b
A	1.690	25.671	1.345
B	0.000	230.225	0.365
C	1.083	13.000	0.968
D	1.629	14.758	0.785
E	1.085	3.654	0.826
F	1.962	2.882	0.350

Tabela 32 - Parâmetros médios de cada grupo utilizando o GEFS e bacia do Itabapoana, chuvas diária

Grupo	L	a	b
A	0.000	439.313	0.489
B	1.108	8.994	0.968
C	1.539	14.252	2.531
D	2.389	18.896	1.858
E	1.324	11.046	1.078